

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **ZAVRŠNI RAD**

Mario Morić

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof.dr.sc. Toma Udiljak

Mario Morić

Zagreb, 2016.



Author	Year	Sample Size
...	...	...

Način korišćenja i postavljanje postoljaka i oboje odvajanje potkrova je prikazano na slikama. Postoljke je potrebno postaviti na izdvojen podlozištu i izjednačiti podlozištima postoljaka. Na ovaj način postolje ima pravilno postavljen na stacionu, izjednači i postavljenost (NUP) i (MPC) na primarnu osu čelika (Zy Machine) i oboje u koordinatnom postavljanju (NUP i MPC) na primarnu NUP i je - fide slika staciona. Kao i postavljanje koordinatnog staciona, ovaj način postavljanja primarne NUP i, Trolisovog koordinatnog staciona NUP i - staciona, a stacioni, Postavljanje staciona potkrova (MPC) postavljanje staciona, a postavljanje staciona na postavljanje staciona, koji koristi oboje odvajanje potkrova, ovaj način i postavljanje staciona i staciona postavljanje i postavljanje oboje odvajanje i koji koristi oboje odvajanje.

[illegible]

# IZJAVA I ZAHVALA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno, koristeći se znanjem i vještinama stečenim tokom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, te navedenom literaturom.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku koji je svojom pomoći, savjetima i ustupljenom literaturom značajno doprinjeo izradi ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem asistentu sa Zavoda za materijale Josipu Županu na utrošenom vremenu i velikoj pomoći pri ispitivanju toplinske vodljivosti i dinamičke viskoznosti pripremljenih suspenzija.

Također, zahvaljujem se cijelokupnom osoblju Laboratorija za alatne stroje, posebice asistentima Mihi Klaiću i Tomislavu Staroveškom na savjetima i iznimnoj pomoći pri mjerenju sila rezanja kod postupka bušenja.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj obitelji na beskrajnom razumijevanju i podršci koju su mi ukazali tokom dosadašnjeg dijela studija.

Mario Morić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD .....	1
2. POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA .....	3
2.1. ZNAČAJ OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA .....	3
2.2. PODJELA POSTUPAKA OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA.....	4
2.3. GIBANJA NA ALATNOM STROJU.....	5
2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI POSTUPAKA OČ .....	5
2.5. REZNI ALATI I ALATNI STROJEVI.....	6
2.6. TOPLINSKE POJAVE I TROŠENJE REZNIH ALATA .....	9
2.7. SREDSTVA HLAĐENJA, ISPIRANJA I PODMAZIVANJA .....	12
2.8. DRY I MQCL OBRADJE .....	14
3. NANOFLUIDI .....	17
3.1. NANOTEHNOLOGIJA .....	17
3.2. HIPOTEZA.....	19
3.3. TOPLINSKA VODLJIVOST.....	21
3.4. VISKOZNOST (UNUTARNJE TRENJE) .....	24
3.5. POVRŠINSKA NAPETOST.....	26
4. EKSPERIMENTALNI DIO 1.....	27
4.1. PLANIRANJE I IZVOĐENJE POKUSA.....	27
4.1.1. Ispitivani nanofluidi .....	27
4.1.2. Priprema nanofluida.....	27
4.1.3. Mjerenje toplinske vodljivosti .....	29
4.1.4. Mjerenje dinamičke viskoznosti .....	30
4.2. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA.....	32
4.2.1. Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti .....	32
4.2.2. Rezultati mjerenja dinamičke viskoznosti .....	35

5. BUŠENJE.....	37
5.1. ALATI ZA BUŠENJE.....	38
5.1.1. Geometrijski parametri reznog dijela alata .....	39
5.1.2. Materijali za izradu svrdla.....	41
5.2. PARAMETRI ZAHVATA KOD BUŠENJA.....	42
5.3. PARAMETRI BUŠENJA.....	43
5.4. SILE I MOMENTI KOD BUŠENJA .....	45
5.5. TROŠENJE I POSTOJANOST SVRDLA.....	47
6. EKSPERIMENTALNI DIO 2.....	50
6.1. OPREMA ZA IZVOĐENJE EKSPERIMENTA .....	50
6.1.1. Alatni stroj .....	50
6.1.2. Alat.....	52
6.1.3. Obradak.....	52
6.1.4. Mjerni sustav.....	53
6.1.4.1. Uređaj za mjerenje sila rezanja .....	53
6.1.4.2. Programski paket.....	54
6.2. PLANIRANJE I PROVEDBA EKSPERIMENTA.....	55
6.3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	57
6.3.1. Rezultati mjerenja aksijalne sile bušenja .....	57
6.3.2. Rezultati mjerenja rezultatne sile.....	60
7. ZAKLJUČAK .....	63
LITERATURA.....	65

# POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Utjecajni faktori na proizvodnju .....	1
<b>Slika 2.</b> Troškovi u obradi odvajanjem čestica .....	2
<b>Slika 3.</b> Obrada odvajanjem čestica kao sustav .....	3
<b>Slika 4.</b> Klasifikacija postupaka obrade odvajanjem čestica .....	4
<b>Slika 5.</b> Prikaz razdvajanja i odvajanja materijala .....	7
<b>Slika 6.</b> Tehnološki (geometrijski) kutovi reznog alata .....	7
<b>Slika 7.</b> Glavni izvori topline .....	9
<b>Slika 8.</b> Temperature u zoni obrade .....	9
<b>Slika 9.</b> Raspodjela topline u ovisnosti o brzini rezanja .....	10
<b>Slika 10.</b> Uzročno posljedični lanac trošenja alata .....	11
<b>Slika 11.</b> Kvalitativni udjeli mehanizama trošenja u ovisnosti o temperaturi .....	11
<b>Slika 12.</b> Kronološki razvoj sradstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje .....	12
<b>Slika 13.</b> Zavisnost primjene SHIP – a o postupku obrade .....	15
<b>Slika 14.</b> Shematski prikaz dobave SHIP – a kod MQL obrada .....	16
<b>Slika 15.</b> MQCL obrada s dobavom SHIP – a pomoću 3 mlaznice .....	16
<b>Slika 16.</b> Usporedni prikaz različitih dimenzija .....	17
<b>Slika 17.</b> Broj objavljenih radova u području nanofluida .....	18
<b>Slika 18.</b> Shematski prikaz nanočestice .....	19
<b>Slika 19.</b> Ovisnost toplinske vodljivosti o volumnom udjelu nanočestica .....	21
<b>Slika 20.</b> Ovisnost toplinske vodljivosti o temperaturi .....	22
<b>Slika 21.</b> Newtonov zakon viskoznosti .....	24
<b>Slika 22.</b> Utjecaj koncentracije nanočestica na dinamičku viskoznost .....	25
<b>Slika 23.</b> Određivanje kontaktnog kuta i površinske napetosti fluida na obratku .....	26
<b>Slika 24.</b> OHAUS Analytical Plus analitička vaga .....	28
<b>Slika 25.</b> Homogenizacija nanofluida u ultrazvučnoj kupci BRANSONIC 220 .....	28
<b>Slika 26.</b> Decagon KD2 Pro .....	29
<b>Slika 27.</b> Termostatirana kupelj LAUDA ECO RE 415 .....	30
<b>Slika 28.</b> Shematski prikaz rada BROOKFIELD - ovog reometra .....	31
<b>Slika 29.</b> BROOKFIELD - ov reometar i termostatirana kupelj .....	31
<b>Slika 30.</b> Dijagram ovisnosti toplinske vodljivosti o koncentraciji nanočestica .....	32
<b>Slika 31.</b> Dijagram ovisnosti toplinske vodljivosti o temperaturi nanofluida .....	33

<b>Slika 32.</b> Dijagram ovisnosti relativne toplinske vodljivosti o koncentraciji nanočestica .....	33
<b>Slika 33.</b> Dijagram ovisnosti toplinskog otpora o koncentraciji nanočestica .....	34
<b>Slika 34.</b> Dijagram ovisnosti dinamičke viskoznosti o koncentraciji nanočestica .....	35
<b>Slika 35.</b> Dijagram ovisnosti dinamičke viskoznosti o temperaturi nanofluida .....	35
<b>Slika 36.</b> Dijagram - omjer vodljivost/viskoznost u ovisnosti o koncentraciji nanočestica ....	36
<b>Slika 37.</b> Bušenje – kinematika.....	37
<b>Slika 38.</b> Spiralno svrdlo.....	38
<b>Slika 39.</b> Podjela spiralnih svrdla prema izvedbi drške .....	38
<b>Slika 40.</b> Geometrija spiralnog svrdla.....	40
<b>Slika 41.</b> Podjela svrdla prema geometriji oštrice .....	40
<b>Slika 42.</b> Parametri odvojene čestice kod bušenja .....	42
<b>Slika 43.</b> Bušenje spiralnim svrdlom .....	43
<b>Slika 44.</b> Raspored brzine rezanja duž glavne oštrice .....	43
<b>Slika 45.</b> Posmak svrdla.....	44
<b>Slika 46.</b> Sile rezanja kod postupka bušenja.....	45
<b>Slika 47.</b> Taylorov princip trošenja.....	47
<b>Slika 48.</b> Najčešći oblici trošenja: a) trošenje stražnje površine, b) kratersko trošenje, .....	48
c) naljepak (BUE), d) zarezno trošenje .....	48
<b>Slika 49.</b> Trošenje svrdla: a) trošenje stražnje površine, b) plastična deformacija, .....	49
c) krzanje, d) naljepak (BUE) .....	49
<b>Slika 50.</b> Trošenje stražnje površine svrdla (VB) .....	49
<b>Slika 51.</b> Troosna NU portalna glodalica.....	51
<b>Slika 52.</b> Svrdlo korišteno u eksperimentu .....	52
<b>Slika 53.</b> Prikaz stegnutog obratka za vrijeme obrade .....	53
<b>Slika 54.</b> Uređaj za mjerenje sila Kistler 9257B.....	53
<b>Slika 55.</b> Određivanje parametara obrade i prikaz rezultata mjerenja .....	54
<b>Slika 56.</b> Uređaj za ultrazvučno miješanje – ultrazvučna sonotroda .....	55
<b>Slika 57.</b> Vrijednosti aksijalne sile $F_z$ za kombinaciju suspenzija K1 i K2 .....	57
<b>Slika 58.</b> Vrijednosti aksijalne sile $F_z$ za kombinaciju suspenzija K2 i K3 .....	58
<b>Slika 59.</b> Vrijednosti aksijalne sile $F_z$ za kombinaciju suspenzija K3 i K4 .....	58
<b>Slika 60.</b> Vrijednosti aksijalne sile $F_z$ za kombinaciju suspenzija K4 i K1 .....	59
<b>Slika 61.</b> Vrijednosti rezultantne sile $F_r$ za kombinaciju suspenzija K1 i K2 .....	60
<b>Slika 62.</b> Vrijednosti rezultantne sile $F_r$ za kombinaciju suspenzija K2 i K3 .....	61
<b>Slika 63.</b> Vrijednosti rezultantne sile $F_r$ za kombinaciju suspenzija K3 i K4.....	61



<b>Slika 64.</b> Vrijednosti rezultantne sile $Fr$ za kombinaciju suspenzija K4 i K1 .....	62
--	----

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Komparacija sredstava na bazi vode i sredstava na bazi ulja.....	14
<b>Tablica 2.</b> Prikaz osnovnih svojstava baznih fluida i nanočestica .....	20
<b>Tablica 3.</b> Toplinska vodljivost (TC – thermal conductivity) nanofluida .....	22
<b>Tablica 4.</b> Vrste ispitivanih fluida .....	27
<b>Tablica 5.</b> Tehničke karakteristike glodalice.....	51
<b>Tablica 6.</b> Tehnološke karakteristike uređaja za mjerenje sila.....	54
<b>Tablica 7.</b> Plan provedbe eksperimenta.....	56

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Značanje
$v_c$	m/min	brzina rezanja
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$\gamma$	°	kut prednje površine
$\beta$	°	kut klina
$\alpha$	°	kut stražnje površine
$a_p$	mm	dubina rezanja
$W_{uk}$	J	ukupni generirani rad u postupcima OOČ
$W_1$	J	rad utrošen na formiranje odvojene čestice
$W_2$	J	rad utrošen na savladavanje trenja
$Q_{def}$	J	toplina nastala deformacijom odvojene čestice
$Q_{tr}$	J	toplina nastala uslijed trenja na p.p.a i s.p.a. *
$Q_{oč}$	J	toplina koja se prenosi na odvojenu česticu
$Q_{al}$	J	toplina koja se prenosi na alat
$Q_{ob}$	J	toplina koja se prenosi na obradak
$Q_{ok}$	J	toplina koja se izgubi u okoliš
$q$	l/h	volumenski protok
$\mu$	Pas	dinamička viskoznost
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\lambda$	W/mK	toplinska vodljivost
$c_p$	kJ/kgK	specifični toplinski kapacitet
$\theta$	°	kontaktni kut
$2\varphi$	°	kut vrha svrdla
$\omega$	°	kut zavojnice utora
$\psi$	°	kut poprečne oštrice
$b$	mm	širina odvojene čestice
$h$	mm	debljina odvojene čestice
$A_1$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka odvojene čestice
$n$	min <sup>-1</sup>	učestalost vrtnje svrdla
$v_{cm}$	m/min	srednja brzina rezanja
$f$	mm	posmak

$f_z$	mm	posmak po oštrici svrdla
$z$	-	broj oštrica
$D$	mm	promjer svrdla
$F_c$	N	glavna sila rezanja
$F_f$	N	posmična sila
$F_p$	N	pasivna (natražna) sila
$F_t$	N	sila trenja
$F_{cp}$	N	glavna sila rezanja poprečne oštrice
$F_{fp}$	N	posmična sila poprečne oštrice
$F_a, F_z$	N	aksijalna sila bušenja
$M_u$	Nm	ukupan moment bušenja
$M_{Fc}$	Nm	moment uslijed djelovanja $F_c$
$M_{Fcp}$	Nm	moment uslijed djelovanja $F_{cp}$
$M_t$	Nm	moment uslijed djelovanja trenja na rubovima svrdla
$k_c$	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	specifična sila rezanja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	vlačna čvrstoća
$R_e$	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	granica razvlačenja
$F_r$	N	rezultantna sila

---

**\*Napomena:** p.p.a. – prednja površina alata

s.p.a. – stražnja površina alata

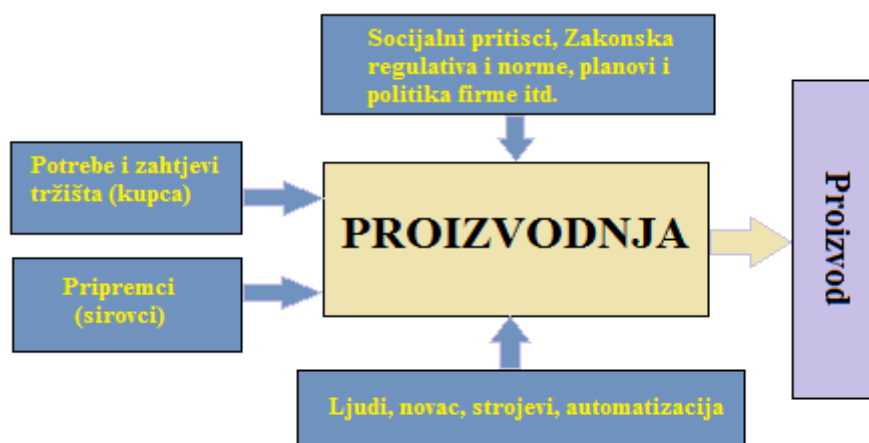
# SAŽETAK

Ubrzani razvoj nanotehnologije nudi nove mogućnosti u području primjene SHIP – a. Dodatkom nanočestica osnovnom SHIP – u nastaju nanofluidi čiji je spektar primjene veoma raznolik. Sa stajališta obrade odvajanjem čestica, nanofluidi pokazuju izniman potencijal u pogledu unaprijeđenja odvijanja samog procesa. Posebno se to odnosi na reduciranje sila rezanja i postizanje veće postojanosti alata. U ovome radu bilo je potrebno istražiti učinak dodavanja grafitnih nanočestica baznom SHIP – u. U uvodnom dijelu rada dan je kratki pregled osnovnih značajki obrade odvajanjem čestica (podjela, gibanja, alat, alatni stroj, SHIP itd.). Nakon uvodnog dijela spomenuto je nešto više o nanotehnologiji te nanofluidima i njihovoj primjeni. Razlog dodavanja nanočestica osnovnom SHIP – u je poboljšanje toplinskih svojstava, prvenstveno toplinske vodljivosti. Prema tome, u eksperimentalnom dijelu 1 bilo je potrebno ispitati toplinsku vodljivost i dinamičku viskoznost pripremljenih suspenzija pri temperaturama 20 °C, 30 °C i 40 °C. U eksperimentu su korištene četiri suspenzije – čista 5% - na emulzija, emulzija sa dodatkom nanočestica 0,5 g/l, emulzija sa dodatkom nanočestica 1 g/l i emulzija sa dodatkom nanočestica 2 g/l. Nakon analize dobivenih rezultata mjerenja, u drugom dijelu rada prikazan je sažeti pregled osnovnih karakteristika postupka bušenja (alati – svrdla, geometrija svrdla, parametri bušenja, trošenje alata itd.). Eksperimentalni dio 2 proveden je sa ciljem istraživanja utjecaja dodavanja grafitnih nanočestica osnovnom SHIP – u na sile rezanja pri postupku bušenja. U eksperimentalnom dijelu 2 korištene su iste suspenzije kao i u prvom dijelu. Nakon provedenih ispitivanja, uslijedila je analiza rezultata mjerenja te je donesen zaključak.

**Ključne riječi:** SHIP, nanofluidi, toplinska vodljivost, sile rezanja

# 1. UVOD

Čovjek se oduvijek koristio različitim metodama kako bi proizveo određeni proizvod koji će mu na specifičan način pomoći odnosno koristiti u svakodnevnom životu. Načini proizvodnje su se tijekom vremena veoma mijenjali jer su morali pratiti želje čovjeka, koje su postajale sve zahtjevnije. Industrijska proizvodnja složeni je lanac međusobno povezanih aktivnosti čiji je glavni cilj pretvaranje sirovog materijala u koristan i funkcionalan proizvod. Zadatak svake proizvodnje je realizacija projektiranog oblika i dimenzija uz što veću kvalitetu (zadržavanje traženih svojstava) i što niže troškove. Drugim riječima, cilj je proizvoditi što kvalitetnije proizvode, uz što bolja uporabna svojstva, dopadljiviji izgled, nižu cijenu te što veću dobit. Navedeno je moguće postići optimalnim izborom tehnoloških postupaka, konstrukcijskih rješenja i materijala. Iz toga proizlazi teza da pravilan razvoj i unaprijeđenje proizvoda bitno ovise o usklađivanju konstrukcijskih i tehnoloških parametara, te svojstava materijala. Težnja je da vrijeme proizvodnje bude što kraće kako bi se na što brži i lakši način osvojilo tržište. Zadatak je odrediti i definirati materijale, strojeve, opremu, alate i željeni proces kojim će se proizvod izraditi na efikasan način.



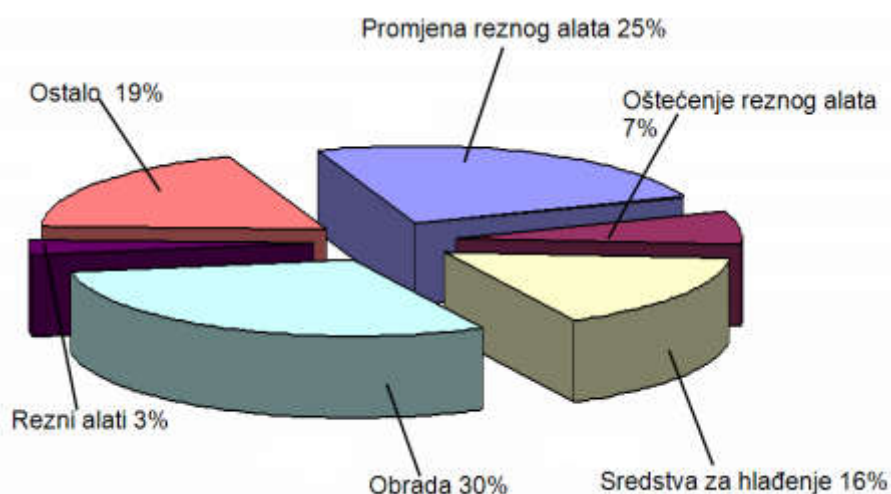
**Slika 1.** Utjecajni faktori na proizvodnju [1]

Razvoj čovječanstva učestalo je bio praćen povećanjem ukupnog znanja, koje se različitim tehnikama i metodama pretvara u vrijednost, tako da je tijekom razvoja čovječanstvo podizalo razinu kvalitete i povećavalo količinu svojih proizvoda i usluga.

Kontinuirani razvoj tehnologije primarno je bio potaknut zahtjevima za održivom proizvodnjom i većom produktivnošću. Razvijeno svijetsko tržište suočava se s brzim i neprestanim promjenama koje se očituju u dinamici ponude široke lepeze proizvoda te brzim zastarjevanjem sadašnjih i novih proizvoda.

Proizvodnja je kako i u dalekoj povijesti tako i danas nezamisliva bez najraširenije tehnologije, obrade odvajanjem čestica. Razvoj obrade odvajanjem čestica se očitovao na razne načine, od poboljšavanja parametara obrade koji su usko vezani za razvoj novih materijala alata, ali i stalnim željama da se do konačnog izgleda proizvoda dođe što jednostavnije i brže, najčešće kroz skraćivanje pripremno završnih vremena.

Danas je nedopustivo razvijati nove tehnologije koje ne udovoljavaju sve većim zahtjevima zaštite okoliša. Zaštita okoliša zauzima takvo mjesto u razvoju tehnologije da se od samog početka nastajanja tehnologije mora voditi računa o njoj. Rezultati brojnih istraživanja ukazuju na štetne posljedice i moguće ekološke katastrofe zbog utroška velikih količina sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP). Jedno od rješenja zaštite okoliša je primjena suhih obrada i obrada s minimalnom uporabom SHIP-a (MQCL). Svakodnevno se u obradi odvajanjem troše velike količine SHIP-a što uveliko povećava proizvodne troškove. Pridodajući tome troškove odlaganja otpadnih tekućina koji rapidno rastu, uočava se značaj suhe obrade [2].

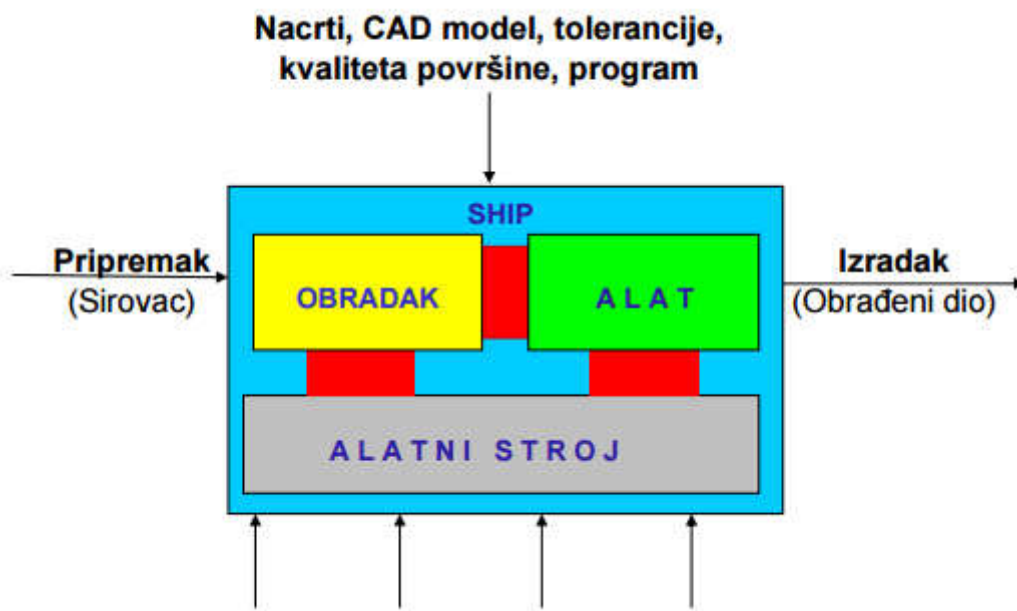


**Slika 2.** Troškovi u obradi odvajanjem čestica [3]

## 2. POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA

### 2.1. ZNAČAJ OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA

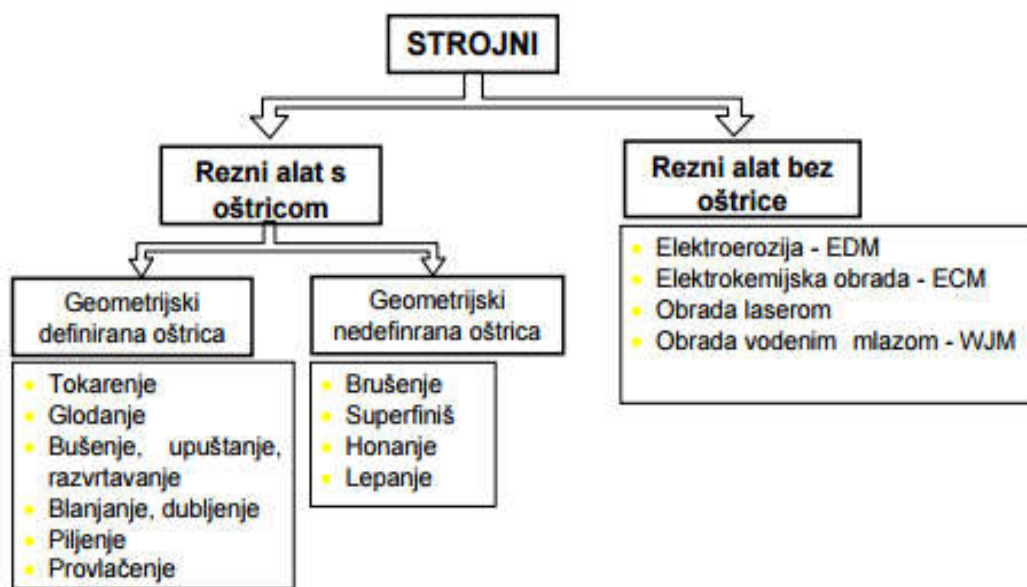
Obrada odvajanjem čestica je jedna je od najznačajnijih proizvodnih tehnologija, koja u sklopu ukupne proizvodnje, u razvijenim zemljama može činiti i do 30% BDP-a. Postupci obrade odvajanjem čestica temelje se na fizičkom odvajanju materijala u svrhu transformiranja sirovog komada u poluproizvod ili gotovi proizvod, a specifični su jer se odvajanjem materijala proizvodu dodaje vrijednost. Veliki značaj obrade odvajanjem čestica vidljiv je iz velikog broja razvijenih postupaka i njihove široke rasprostranjenosti u primjeni. Razvoj alatnih strojeva i alata uveliko je utjecao na ekonomičnost i produktivnost obrade materijala. Obradu odvajanjem čestica moguće je sagledati kao sustav, u kojemu su tri glavna čimbenika obradak, alat i alatni stroj (**Slika 3.**). Proces odvajanja materijala (rezanja) odvija se na sučelju alata i obratka, no da bi cijeli sustav funkcionirao veoma su bitna i zbivanja koja se odvijaju na preostala dva sučelja (alat-alatni stroj i obradak-alatni stroj).



**Slika 3.** Obrada odvajanjem čestica kao sustav [4]

## 2.2. PODJELA POSTUPAKA OBRADE ODVAJANJEM ČESTICA

Postupci obrade odvajanjem čestica prvotno se dijele na ručne (ručni alati, turpijanje, bušenje, piljenje, glodanje) i strojne postupke. Strojni postupci se dalje mogu podijeliti na postupke obrade alatima s reznom oštricom (fizičko odvajanje materijala) i postupke obrade alatima bez rezne oštrice (za odvajanje materijala primjenjuju se različiti oblici energije – mehanička, kemijska, električna, toplinska). Završna podjela odnosi se na postupke obrade alatima s reznom oštricom – postupci obrade alatima s definiranom geometrijom rezne oštrice (tokarenje, glodanje, bušenje, blanjanje itd.) i postupci obrade alatima s nedefiniranom geometrijom rezne oštrice (brušenje, lepanje, honanje). Detaljnija klasifikacija strojnih postupaka prikazana je **Slikom 4**.



**Slika 4.** Klasifikacija postupaka obrade odvajanjem čestica [4]



## 2.3. GIBANJA NA ALATNOM STROJU

Kod postupaka obrade odvajanjem čestica gibanje može biti glavno ili pomoćno. U pomoćna gibanja spadaju posmično gibanje i dostavno gibanje.

- 1) GLAVNO GIBANJE (G) – izvodi se brzinom  $v_c$  (glavna brzina rezanja) i njime se odvija postupak formiranja odvojene čestice pri čemu dolazi do utroška najvećeg dijela snage.

Prema vrsti (načinu) glavno gibanje može biti:

- kružno (rotacijsko) ili pravocrtno (translacijsko)
- kontinuirano ili diskontinuirano

- 2) POSMIČNO GIBANJE (P) – izvodi se brzinom  $v_f$  (posmična brzina) i njime se odžava stalnost (kontinuitet) procesa obrade odvajanjem čestica.

Prema vrsti (načinu) posmično gibanje može biti:

- kružno (rotacijsko) ili pravocrtno (translacijsko)
- kontinuirano ili diskontinuirano

- 3) DOSTAVNO GIBANJE (D) – gibanje izvan same obrade, potrebno za dovođenje alata i obratka u zahvat (primicanje – odmicanje), zauzimanje dubine rezanja i povrat nakon obavljene obrade [4].

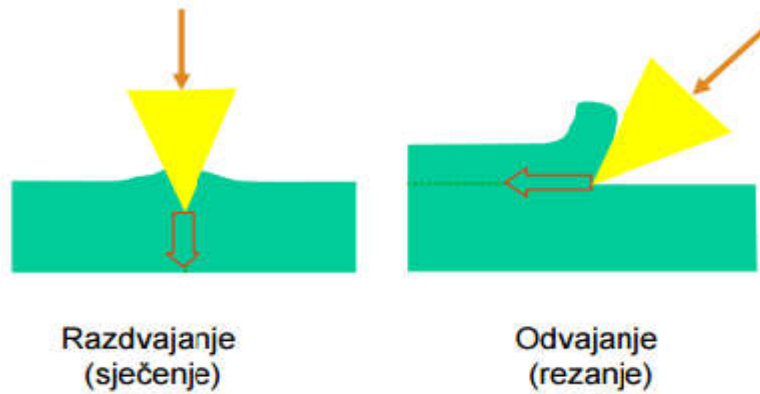
## 2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI POSTUPAKA OOC

Iako postupci obrade odvajanjem nekad i nisu najekonomičniji izbor, široka lepeza povoljnih značajki čini ih iznimno prikladnom tehnologijom. Postizanje točnosti, uskih tolerancija i dobre kvalitete obrađene površine (često nema potrebe za naknadnom obradom – Near Net Shape obrade), zatim formiranje oštih rubova, ravnih površina te unutarnjih i vanjskih profila, mogućnost obrade gotovo svih materijala, mogućnost obrade najsloženijih površina, mogućnost obrade u širokom rasponu dimenzija, mogućnost oblikovanja otvrdnutih (kaljenih) materijala, jednostavna automatizacija itd. samo su neke od prednosti obrade odvajanjem čestica.

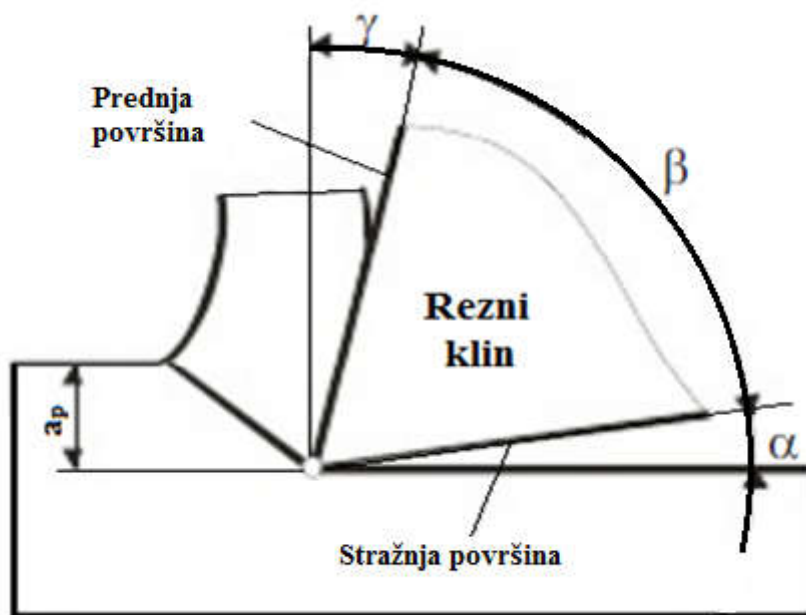
Neki od najistaknutijih nedostataka obrade odvajanjem čestica su generiranje velikih količina odvojenih čestica, ponekad je za izradu određenog elementa obratka potrebno primijeniti više različitih postupaka obrade, alatni strojevi i potreba za rukovanjem alatima i obratcima zahtijevaju velik prostor, velik udio pomoćnih i pripremnih vremena i slično [1].

## 2.5. REZNI ALATI I ALATNI STROJEVI

Od samog početka razvoja civilizacije, ljudi su bili prisiljeni koristiti različita sredstva i pomagala (alate) koja su im omogućavala lakšu i jednostavniju svakodnevicu. Danas se pod pojmom alat krije cijeli niz sredstava koja svakodnevno služe na raznim područjima čovjekova djelovanja poput elektronike, informatike, medicine, strojarstva i slično. U postupcima obrade odvajanjem čestica alat je sredstvo čija je funkcija preoblikovanje priprema (sirovca) u gotov proizvod. Zadatak svakog alata za obradu odvajanjem čestica jest da ispuni dva osnovna uvjeta: 1) skinuti određeni sloj materijala s obratka uz nastojanje da se skine što veća količina u jedinici vremena, 2) osigurati potrebne dimenzije i odgovarajuću geometriju obratka, ali uz traženu kvalitetu obrađene površine i minimalne troškove obrade [5]. Osnovni element svih reznih alata s oštricom je rezni klin. Obzirom na smjer gibanja klina u odnosu na obradak razlikuje se: razdvajanje (sječenje) i odvajanje (rezanje). Osim reznog dijela alata veoma važnu ulogu ima i drška koja služi za prihvatanje alata na alatni stroj te za prijenos sila rezanja [4]. Pravilno dizajniranje i konstruiranje alata od ključne je važnosti jer se time značajno može utjecati na proizvodne troškove. Iznimno je bitan i pravilan odabir alatnog materijala kao i zaštitnih prevlaka. Najčešći materijali reznih alata u postupcima obrade odvajanjem su brzorezni čelici, tvrdi metali, cermet, keramike (oksidna, nitridna, ojačana vlaknima), kubični bornitrid (CBN) i polikristalični dijamant (PCD). Cilj pravlačenja materijala je postizanje površinskog sloja koji će osim zaštite od vanjskih utjecaja (korozija) pružati i dodatnu otpornost na trošenje. Najznačajniji postupci prevlačenja su fizikalno (PVD) i kemijsko (CVD) prevlačenje u parnoj fazi.



Slika 5. Prikaz razdvajanja i odvajanja materijala [4]



Slika 6. Tehnološki (geometrijski) kutovi reznog alata [6]

Kao što **Slika 6.** prikazuje, geometrisjki definirani rezni alati određeni su s tri kuta:

- Prednji kut (kut prednje površine)  $\gamma$
- Kut klina  $\beta$
- Stražnji kut (kut stražnje površine)  $\alpha$

Kut prednje površine može biti pozitivan (+), tj. veći od  $0^\circ$  – najčešći slučaj, zatim jednak  $0^\circ$  – obrada mjedi i bronce, ili negativan (-) što je slučaj kod obrade teško obradivih materijala. Kod velikih negativnih prednjih kuteva dolazi do prekomjerenog zagrijavanja obratka zbog intenzivnije plastične i elastične deformacije. Kut stražnje površine mora biti veći od  $0^\circ$  kako bi postupak odvajanja materijala uopće bio moguć.

Pod pojmom alatni stroj podrazumijeva se svaki stroj koji služi za obradu i izradu pojedinih dijelova svih ostalih strojeva i uređaja. Alatni strojevi su jedini strojevi koji mogu izrađivati sami sebe. Funkcija alatnog stroja je osiguranje međusobnog gibanja između reznog alata i obratka te izdržavanje sila rezanja generiranih prilikom postupka odvajanja materijala. Zajedno s obratkom, reznim alatom i priborom za stezanje i pridržavanje, alatni stroj čini kompleksni obradni sustav čiji je zadatak pretvoriti sirovi komad u poluproizvod ili gotovi proizvod na što efikasniji i ekonomičniji način. Obradom na alatnom stroju nastojimo postići zadani oblik izratka, točnost dimenzija i oblika, potrebnu hrapavost obrađene površine i dobru kvalitetu površinskog sloja. Zahtjevi koji se postavljaju na alatne strojeve uključuju fleksibilnost, modularnost (nadogradnja sustava i kompatibilnost komponenata) i rekonfigurabilnost čime se podrazumijeva funkcionalnost u točno određenom trenutku.

Postoji niz raznih kriterija prema kojima je moguće podijeliti alatne strojeve, a neki od najistaknutijih su:

- prema postupku OOC - tokarilice, glodalice, blanjalice, bušilice itd.
- prema dimenzijama - laki, srednji i teški alatni strojevi
- prema načinu upravljanja - ručno upravljani alatni strojevi, tj. klasični alatni strojevi (KAS) i automatski upravljani alatni strojevi, tj. numerički upravljani alatni strojevi (NUAS)
- prema konstrukcijskom rješenju posmičnog kinematičkog lanca – alatni strojevi sa serijskom (otvorenom) kinematičkom strukturom i alatni strojevi sa paralelnom (zatvorenom) kinematičkom strukturom

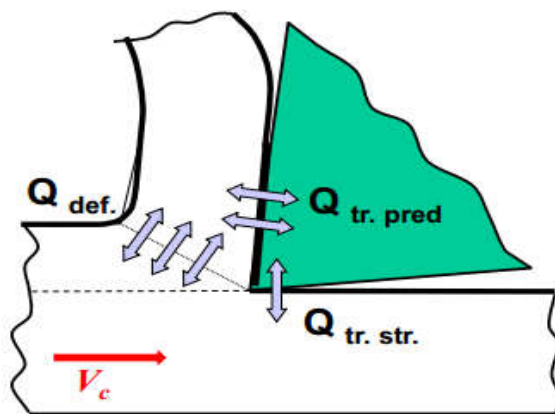
## 2.6. TOPLINSKE POJAVE I TROŠENJE REZNIH ALATA

Ukupan rad koji se generira kod postupaka obrade odvajanjem sastoji se od dvije komponente – rad potreban za deformaciju i formiranje odvojene čestice (~ 70-85%) i rad potreban za savladavanje trenja (~ 15-30%).

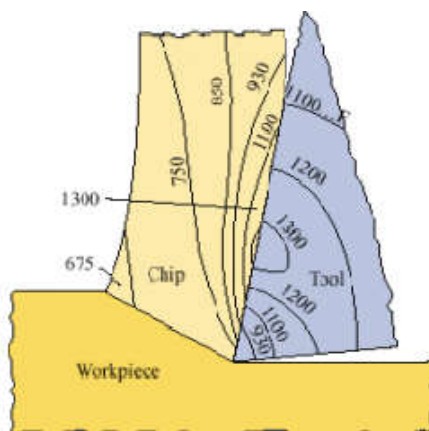
$$W_{uk} = W_1 + W_2$$

Uz pretpostavku da nema gubitaka ukupan dovedeni rad u procesu rezanja pretvara se u toplinu. Glavne izvore topline predstavljaju rad deformiranja i rad trenja na prednjoj i stražnjoj površini alata.

$$Q_{uk} = F \cdot v \cdot t = Q_{def} + Q_{tr}$$



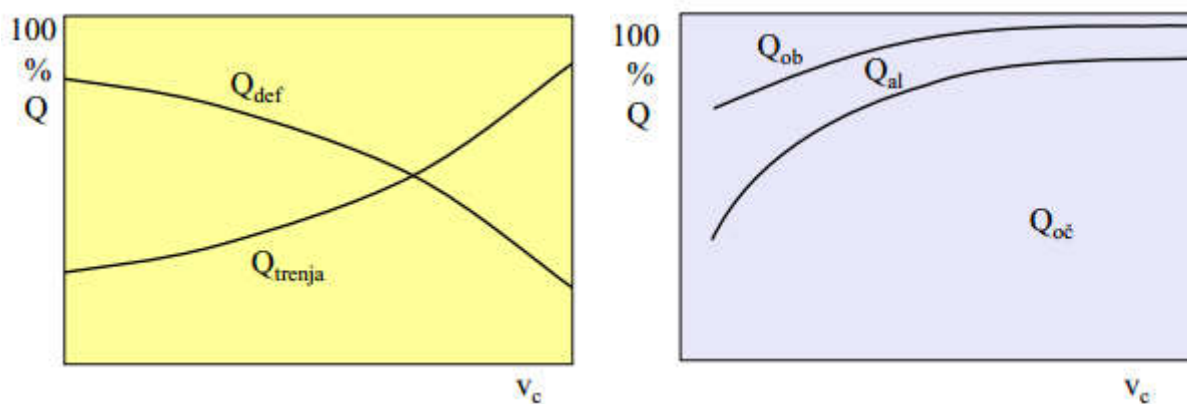
Slika 7. Glavni izvori topline [4]



Slika 8. Temperature u zoni obrade [1]

Toplinska bilanca:

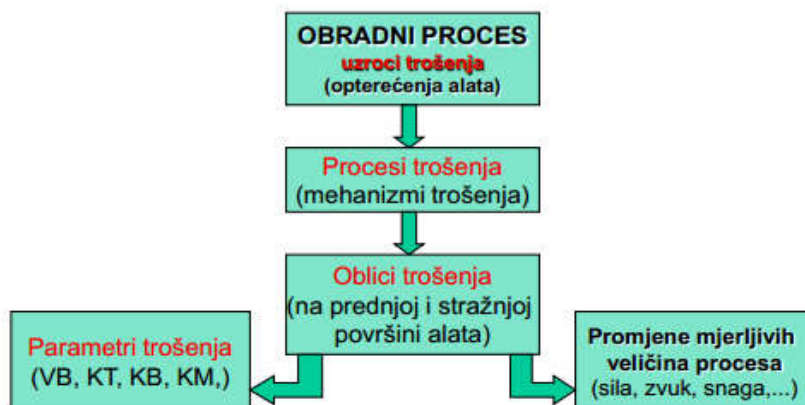
$$Q_{uk} = F \cdot v \cdot t = Q_{def} + Q_{tr} = Q_{oč} + Q_{al} + Q_{ob} + Q_{ok}$$



**Slika 9.** Raspodjela topline u ovisnosti o brzini rezanja [4]

Iz **Slike 9.** može se vidjeti kako se porastom brzine rezanja veći dio rada (energije) troši na savladavanje trenja nego na formiranje odvojene čestice. Isto tako, može se zamijetiti kako pri velikim brzinama rezanja (HSC – High Speed Machining) toplina nastala u procesu obrade odvajanjem gotovo u potpunosti prelazi na odvojenu česticu. Takve obrade stoga zahtijevaju veoma efikasnu i sigurnu evakuaciju odvojene čestice. Zbog toga što „preskaču“ nepovoljno područje brzina, visokobrzinske obrade su otvorile put prema razvoju suhih (Dry) obrada i obrada s minimalnom uporabom SHIP-a (MQCL – Minimum Quantity Cooling Lubrication), o čemu će biti riječ nešto kasnije.

Sve procese obrade odvajanjem neizbježno prati i proces trošenja oštrice reznog alata. Proces trošenja nastaje kao posljedica opterećenja (najčešće mehanička, toplinska i kemijska) kojima je alat izložen tijekom procesa obrade. Obzirom na velik broj ulaznih parametara, i na to da su kvantitativne i kvalitativne prirode, složenost i broj mogućih interakcija je vrlo velik. U postupcima obrade metala tek se približno 30 - 40% energije efektivno utroši na odvajanje materijala. Ostatak energije – topline izgubi se na sučeljima alat – obradak i alat – odvojena čestica. Visoke generirane temperature na prednjoj i stražnjoj površini alata, koje su rezultat plastične deformacije materijala prilikom formiranja odvojene čestice, imaju štetan utjecaj na postojanost reznog alata, površinsku hrapavost i točnost obrade [7].

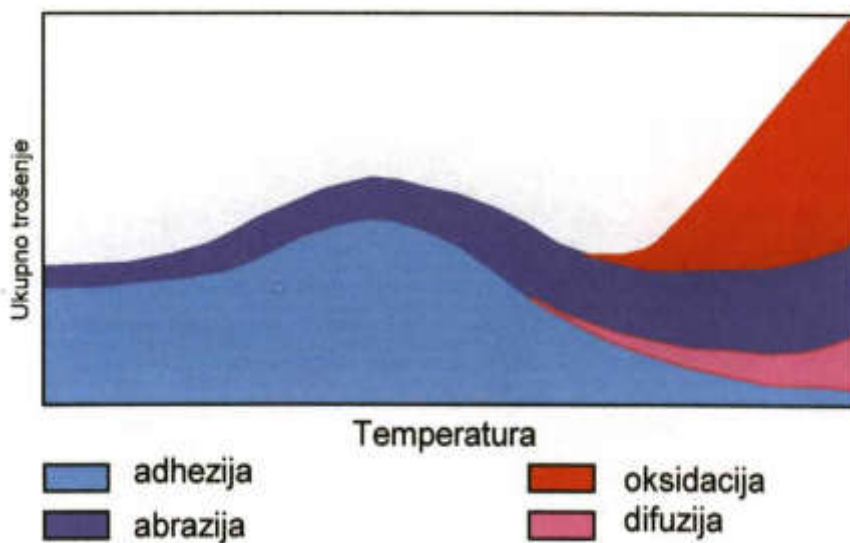


**Slika 10.** Uzročno posljedični lanac trošenja alata [4]

Mehanizme trošenja možemo podijeliti u dvije skupine:

- procesi koji su posljedica mehaničkih opterećenja – abrazija i adhezija
- procesi koji su posljedica kemijskog djelovanja između alata, obratka i okoline – oksidacija i difuzija.

Abrazija i adhezija prusitni su uvijek, ali dominiraju pri nižim temperaturama obrade dok su oksidacija i difuzija karakteristični za povišene temperature obrade.



**Slika 11.** Kvalitativni udjeli mehanizama trošenja u ovisnosti o temperaturi [4]

## 2.7. SREDSTVA HLAĐENJA, ISPIRANJA I PODMAZIVANJA

Sredstva hlađenja, ispiranja i podmazivanja (SHIP) su kompleksne mješavine supstanci, koje se konstantno mijenjaju usred kemijskih, fizikalnih i mikrobioloških faktora, time značajno utječući na odvijanje tehnološkog postupka. Istraživanja prvih fluida za postupke obradbe metala počela su sredinom 18.st. U ranim počecima fokus je bio stavljen na proučavanje utjecaja fluida na reduciranje trenja i odvođenje topline. Do najvećeg napretka u razvoju SHIP – a došlo je za vrijeme Prve industrijske revolucije kada su konstrukcija i dizajn alatnih strojeva doživjeli znatan uzlet, no ništa slabiji efekt nije imalo otkriće nafte čime je započela i Druga industrijska revolucija [8]. **Slika 12.** prikazuje kronološki razvoj sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.

	Poticaaj	Utjecaj na sastav SHIP-a
< 1800	Potražnja za strojnim metalima	Razvoj prvih sredstava baziranih na prirodnim proizvodima, npr. biljna i životinjska ulja
1800 - 1899	Industrijalizacija (alatni strojevi)  Dostupnost mineralnih ulja	Zamjena prirodnih komponenti sa mineralnim uljima  Prva istraživanja vezana uz svojstvo podmazivanja primjenjivanog sredstva
1900 - 1999	Poboljšani alati  Napredni alatni strojevi  Masovna proizvodnja	Dodavanje kemijski aktivnih tvari sa ciljem poboljšanja tehničkih performansi  Primjena kloriranih spojeva, borne kiseline i ostalih štetnih tvari  Reduciranje količine mineralnog ulja u SHIP-u (potaknuto povećanjem cijene sirove nafte)
2000 - danas	Regulative  Energetska učinkovitost i iskoristivost materijala	Zabrana i eliminacija kloriranih supstanci i ostalih štetnih aditiva  Procjene održivosti primjenjivanog SHIP-a  Interdisciplinarne procjene primjenjivanog SHIP-a

**Slika 12.** Kronološki razvoj sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje [8]



Tehnološke funkcije SHIP – a su sljedeće:

- podmazivanje površina alata na kojima se razvija trenje (prednja i stražnja površina reznog alata)
- hlađenje alata i obratka, čime se sprječava povećanje temperature, usporava trošenje alata i omogućava obrada većim brzinama
- odvođenje (ispiranje) odvojenih čestica i prašine s alata i obratka, čime se reducira trošenje alata i poboljšava kvaliteta obrađene površine
- smanjenje sila rezanja
- antikorozijska zaštita – zaštita obrađene površine od štetnog djelovanja okoline.

Načini dobave (dovođenja) SHIP – a:

- slobodni mlaz
- pod niskim tlakom
- pod visokim tlakom
- u struji stlačenog zraka. [1]

Fluidi primjenjivi u postupcima obradbe metala klasificiraju se na temelju različitih kriterija kao što su: sastav (bazno sredstvo), proizvodni proces (fluidi za postupke rezanja/odvajanja, fluidi za postupke oblikovanja deformiranjem, fluidi za postupke brušenja itd.) i količina fluida (konvencionalne obrade, MQCL obrade, DRY obrade itd.). Prema sastavu SHIP – ove dijelimo na sredstva na bazi vode čija je primarna funkcija hlađenje alata i obratka te sredstva na bazi ulja čija je primarna funkcija podmazivanje kontaktnih površina. Sredstva na bazi vode još se dijele na emulzije (mješavine vode i ulja u približnom omjeru 95% : 5%) i vodene otopine. Zbog toga što su veoma nestabilne, emulzije se redovito stabiliziraju emulgatorima koji se sastoje od lipofilnog i hidrofilnog dijela i na taj način omogućuju efikasno raspršivanje uljnih kapljica u vodi. **Tablica 1.** prikazuje usporedbu sredstava na bazi vode i sredstava na bazi ulja [8].

**Tablica 1.** Komparacija sredstava na bazi vode i sredstava na bazi ulja [8]

Komponenta	Količina(%)		
	Vodene otopine	Emulzije(5%)	Sredstva na bazi ulja
Mineralno ulje	-	3,5-4,0	75-100
Emulgatori	-	0,5-1,0	-
Veziva	-	0,05-0,25	-
pH puferi	5	-	-
Korozijski inhibitori	10	0,25-0,50	0-5
Antifriksijski aditivi	4	0-0,5	5-20
Biocidi	2	nepoznato	-
Antioksidansi	-	-	0-2
Poboljšivači podmazivanja	9	-	0-10
Voda	70	95	-

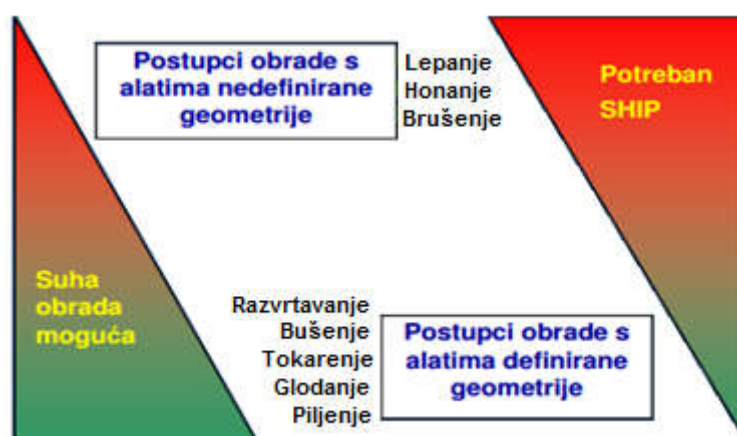
## 2.8. DRY I MQCL OBRADU

Iako doprinosi značajnim poboljšanjima u postupcima obrade odvajanjem materijala, prisutnost i primjena SHIP – a sa sobom nosi značajne rizike. Negativne posljedice primjene SHIP-a su sljedeće:

- mogućnost stvaranja dioksina (spojevi na bazi klora)
- štetno djelovanje na zdravlje ( karcinomi, kožna oboljenja, bolesti dišnog sustava - astma, alergijske reakcije, problemi s očima itd.)
- štetno djelovanje na okoliš
- štetno djelovanje na alatni stroj
- povećani troškovi održavanja
- opasnost od požara (SHIP – ovi koji sadrže ulje)
- mikrobiološka kontaminacija (SHIP – ovi koji sadrže vodu).

Održavanje i raspolaganje SHIP – om predstavlja velik izazov s ekološkog i ekonomskog stajališta. Unutar zadnjih par desetljeća donesene su mnoge regulative u pogledu zaštite okoliša i očuvanja zdravlja, koje ograničavaju ili u potpunosti zabranjuju primjenu određenih kemijskih supstanci (npr. hlapivih organskih spojeva, biocida itd.). Borna kiselina, amini i klorirani proizvodi bili su veoma primjenjivane tvari, no kada je otkriveno da mogu uzrokovati razne zdravstvene probleme brzo su se našli na listi zabranjenih supstanci. Unatoč težnji da se količina takvih supstanci maksimalno minimizira, suvremeni SHIP - ovi i dalje sadrže velik broj štetnih aditiva [8].

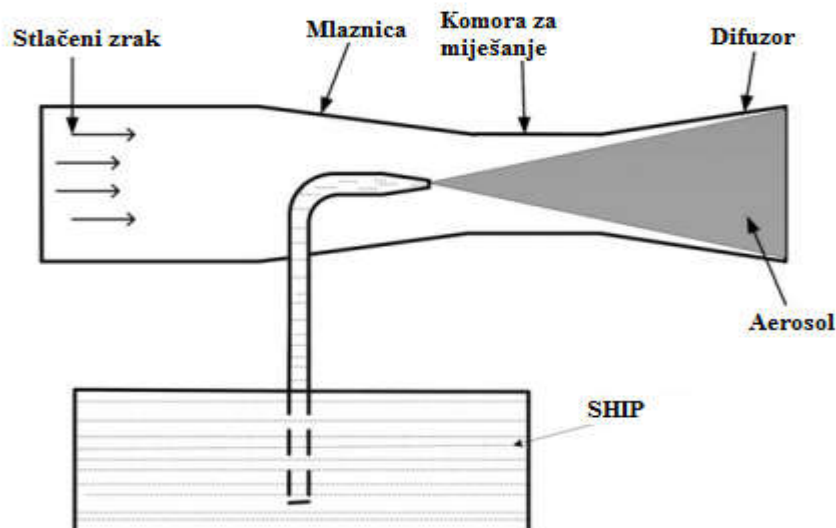
Zbog štetnih posljedica primjene SHIP – a došlo je do ubrzanog razvoja Dry i MQCL obrada. Primjena Dry i MQCL obrada predstavlja alternativu ovome problemu zbog toga što se koriste minimalne potrebne količine sredstva za hlađenje ili podmazivanje, najčešće u struji stlačenog zraka. Zahvaljujući odličnoj sposobnosti podmazivanja i biorazgradivosti, kod MQL obrada se najviše primjenjuju biljna ulja i esteri. Uspoređujući količine dobavljanog sredstva kod MQL obrada i klasičnih obrada gdje je opskrba SHIP – om obilna, uočava se značajna redukcija primjenjivanog sredstva. Naime, prosječni protoci kod MQL obrada su  $q = 50 \text{ ml/h}$  dok je kod klasičnih obrada taj iznos neizmjereno veći, npr.  $q = 150 \text{ l/h}$ . Prednosti primjene MQL obrada su višestruke: zdraviji okoliš, veća sigurnost, smanjen štetan utjecaj na ljudski organizam, manja potrošnja ulja i energije, lakša reciklacija čestica, manji troškovi održavanja alatnog stroja, veća postojanost alata i veća produktivnost. Dry i MQCL obrade moguće su kod obrada s alatima definirane geometrije reznog dijela, no kod obrada gdje rezna oštrica nije geometrijski definirana dolazi do puno veće deformacije, što vodi do većeg trenja a samim time i do razvijanja puno većih temperatura, stoga je primjena SHIP – a neophodna.



**Slika 13.** Zavisnost primjene SHIP – a o postupku obrade [1]

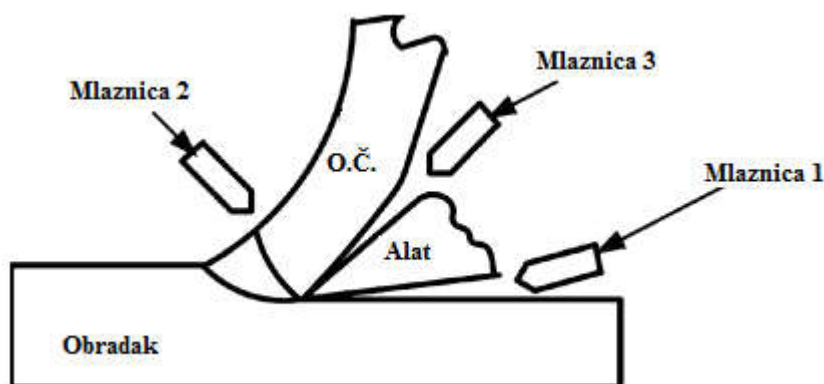
Funkcionalnost i učinkovitost MQCL tehnike može se unaprijediti specijaliziranim sredstvima poboljšanih svojstava kao što su npr. nanofluidi. Konvencionalni sustavi kontinuirane dobave velikih količina SHIP – a do kontaktnih zona su veoma neučinkoviti. Razlog tomu je to što SHIP jako teško može doprijeti do najkritičnijih zona. Puno učinkovitija metoda je primjena „magle“, tj. aerosola u zraku (čestice SHIP – a raspršene u zraku), i to pod visokim tlakom. Takva metoda se redovito primjenjuje kod MQL obrada. Kod takve se metode koristi ejektor – raspršivač koji pomoću stlačenog zraka raspršuje čestice ulja (Slika 14.).

Komprimirani zrak putuje mlaznicom i dolazi do zone miješanja. Zbog suženog presjeka u zoni miješanja dolazi do smanjenja tlaka, tj. statički tlak je niži od atmosferskog što za posljedicu ima stvaranje vakuuma pomoću kojeg se SHIP usisava iz spremnika.



**Slika 14.** Shematski prikaz dobave SHIP – a kod MQL obrada [9]

**Slika 15.** prikazuje jedan od načina dobave SHIP – a kod MQCL obrade putem 3 mlaznice. Fluid dobavljen kroz mlaznicu 1 služi kako bi se reduciralo trenje između alata i obratka te kako bi smanjilo trošenje na stražnjoj površini alata (eng. Flank Wear). Fluid dobavljen kroz mlaznicu 2 pospješuje formiranje odvojene čestice, ali i odvođenje toplote iz smične zone, dok fluid dobavljen kroz mlaznicu 3 odvodi toplinu iz zone kontakta prednje površine alata i odvojene čestice. Sistem dobave SHIP – a pomoću vanjskih mlaznica je relativno učinkovit, iako je puno praktičniji način dobave unutarnjim kanalima napravljenim u samome alatu [9].

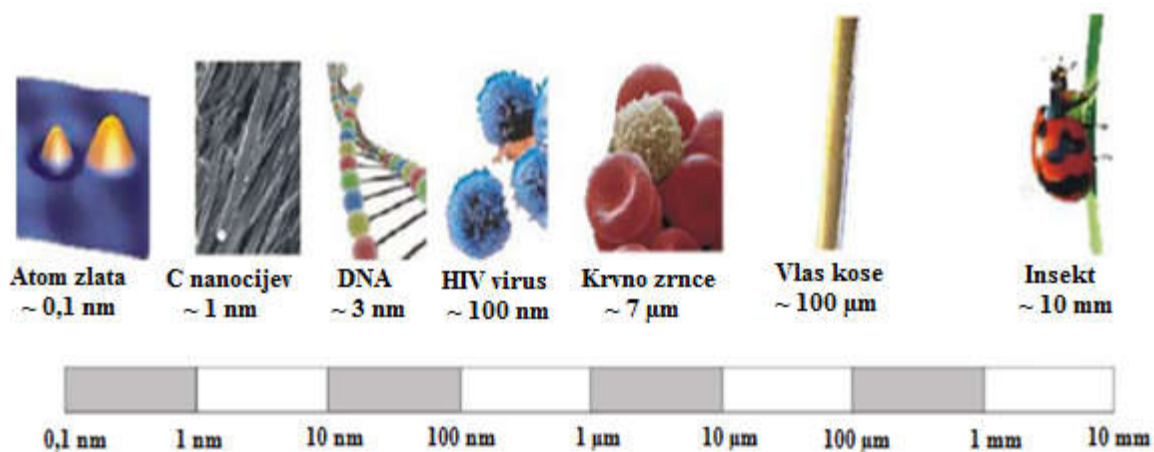


**Slika 15.** MQCL obrada s dobavom SHIP – a pomoću 3 mlaznice [9]

### 3. NANOFLUIDI

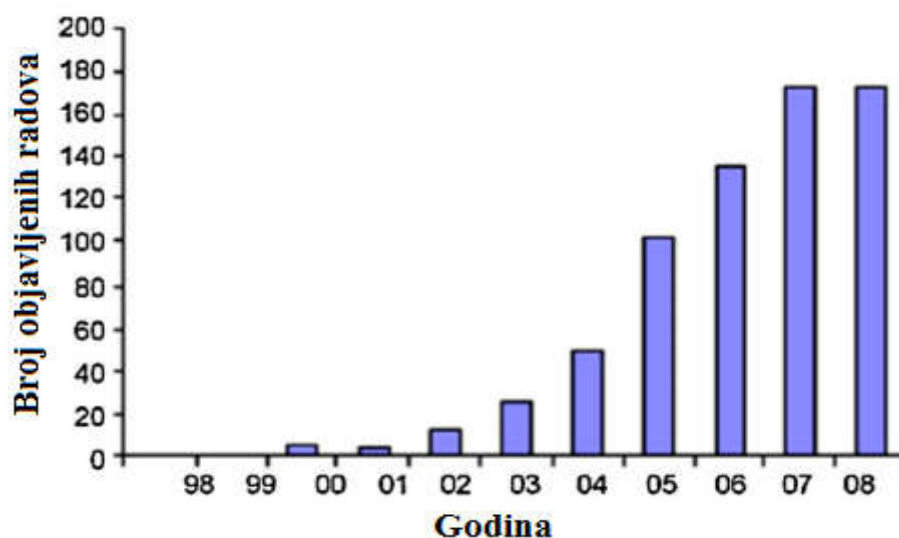
#### 3.1. NANOTEHNOLOGIJA

Nanotehnologija, relativno nova grana znanosti koja se počela razvijati u drugoj polovici 20. stoljeća, predstavlja područje koje se bavi „manipulacijom“ materije na atomskoj i molekularnoj razini. Prefiks „nano“ potiče od grčke riječi „nannos“ što označava nešto sićušno. Izraz nanotehnologija prvi je uveo Norio Taniguchi sa Sveučilišta znanosti u Tokiju (Tokyo Science University) na međunarodnoj konferenciji inženjerstva održanoj u Tokiju 1974.god. [10]. Nanotehnologija obuhvaća proizvodnju i primjenu fizikalnih, kemijskih i bioloških sustava na skalama u rasponu od pojedinačnog atoma ili molekula do podmikronskih dimenzija kao i integraciju stvorenih nanostrukture u veće sustave. Bilo koju tehnologiju čije je polje djelovanja veličine reda milijarditog dijela metra ( $1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$ ) možemo smatrati nanotehnologijom. Nanotehnologija otkriva da materijali kakve poznajemo pokazuju bitno drugačija svojstva kada su smanjeni na nano razinu. Takve nove mogućnosti mogu se izjednačiti s otkrivanjem novih materijala, a nude ljudskom rodu potpuno nove kombinacije za napredak znanosti.



**Slika 16.** Usporedni prikaz različitih dimenzija [11]

U posljednjem desetljeću nanotehnologija je bila predmet mnogih istraživanja stoga je danas njena primjena široko rasprostranjena. Najveći udio u razvoju imale su moćne države poput SAD - a, Kine, Indije i S.Koreje. Razvojem nanotehnologije paralelno su se razvijali i nanomaterijali (**Slika 17.**). Najznačajniji je svakako bio razvoj nove vrste radnih medija – nanofluida, koji su se zahvaljujući odličnim tehničkim performansama veoma brzo profilirali na tržištu, ali i u primjeni. Medicina, farmacija, elektronika, računarstvo, građevinarstvo, industrija (proizvodna, vojna, prehrambena, tekstilna) i energija samo su neka od područja u kojima je nanotehnologija veoma prisutna. Iako je već sada sveprisutna, prognozira se kako će u budućnosti nanotehnologija imati još veći značaj [11].

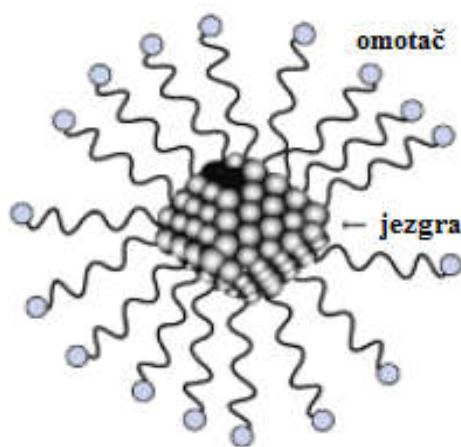


**Slika 17.** Broj objavljenih radova u području nanofluida [11]

Nanotehnologija sve više ide u smjeru molekularne proizvodnje, tj. bazira se na manipulaciji i slaganju materije na atomskoj i molekularnoj razini u svrhu dobivanja željene strukture na makro nivou. Iako su mogućnosti i izazovi u primjeni nanotehnologije beskrajno opširni, negativan utjecaj na ljudsko zdravlje i okoliš predstavlja veliki problem. Naime, problem je izrazito mala veličina zbog koje su nanočestice sposobne prolaskom zaštitnih barijera poput kože naštetiti ljudskom organizmu. Isto tako, negativna činjenica je što se iznimno velike svote ulažu u razvoj nanotehnologija dok su veoma mali iznosi namijenjeni istraživanjima u području sigurnosti.

### 3.2. HIPOTEZA

Ubrzanim razvojem nanotehnologije, u tehničkoj se primjeni gotovo u potpunosti etablirala skupina relativno novijih radnih medija – nanofluida. Termin „nanofluidi“ uveo je 1995.g. znanstvenik S.U.S. Choi, koji je u Aragonne National Laboratory radio na programu razvoja novog fluida za prijenos energije nazvanom „Advanced Fluids Programme“ [12]. Nanofluidi su koloidalne suspenzije osnovnog fluida i krutih čestica veličine 1-100 nm. Kao osnovni fluidi pretežno se koriste voda, emulzije, vodene otopine, ulja, polimerne otopine itd., dok se nanočestice najčešće dobivaju od čistih metala (Cu,Fe,Au,Ag,Al) ili oksidne keramike ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), iako je i vrlo česta primjena ugljika u raznim oblicima – grafit, nanocjevčice (CNT – carbon nanotubes), fullerene. Većina nanočestica sastoji se od jezgre koja može biti metalna ili keramička te tanke ljuske (omotač) koja je uglavnom molekularna. Struktura nanočestice prikazana je **Slikom 18**. Stabilnost nanofluida je jedno od osnovnih tehnoloških svojstava za industrijsku primjenu koje predstavlja sposobnost suspenzija da ostanu jednakog i homogenog sastava tijekom dužeg vremenskog perioda, tj. da se ne pojavi aglomeracija dispergiranih čestica. Unatoč tomu što se nanočestice zbog svog Brownovog gibanja dobro raspršuju u osnovnom fluidu, stabilnost nanofluida redovito se osigurava primjenom disperzanata (surfaktanti), iako je veoma efikasna i metoda modificiranja (prevlačenja) površine nanočestica. Osim disperzanata, nanofluidima se obavezno dodavaju i različiti aditivi (korozijski inhibitori, biocidi, emulgatori itd.) kako bi se poboljšala njihova funkcionalnost i učinkovitost. Generalno gledano, svojstva nanofluida u potpunosti su određena svojstvima nanočestica, osnovnog fluida i aditiva, ali i disperzijom [7].



**Slika 18.** Shematski prikaz nanočestice [7]

Primarni razlog zbog kojeg se nanočestice dodavaju osnovnom fluidu je poboljšavanje toplinskih svojstava (porast toplinske vodljivosti i koeficijenta konvektivnog prijelaza topline), bez značajnog povišenja viskoznosti fluida. Nanofluidi i pri veoma malim koncentracijama nanočestica pokazuju mnogo bolju toplinsku vodljivost u odnosu na konvencionalne fluide. Efikasnije odvođenje topline značajno utječe na smanjenje rizika od neželjenih pojava kao što su fazne transformacije, zaostala vlačna naprezanja, pukotine, reduciranje lomne čvrstoće, toplinske pojave itd. Poboljšana toplinska vodljivost omogućava lakši prijenos topline što predstavlja ključni razlog zbog kojeg su nanofluidi primjenjivani u raznim aplikacijama: hlađenje i zagrijavanje građevina, hlađenje elektroničke opreme, hlađenje motora, hlađenje nuklearnih reaktora, solarno grijanje vode, hladnjaci i rashladni agregati, izmjenjivači topline, medij za hlađenje i podmazivanje kod postupaka obradbe metala, primjena u biomedicini (magnetski nanofluidi za odvajanje stanica i molekula iz kompleksnih struktura) itd. [11] Sa stajališta obrade odvajanjem, dodavanje nanočestica osnovnom SHIP – u, tj. formiranje nanofluida nudi mnoge mogućnosti. Osim poboljšanih toplinskih svojstava nanofluidi pokazuju veliki potencijal u pogledu postizanja bolje kvalitete obrađene površine i veće postojanosti reznih alata (manje trenje, manje sile rezanja, manje trošenje).

**Tablica 2.** Prikaz osnovnih svojstava baznih fluida i nanočestica

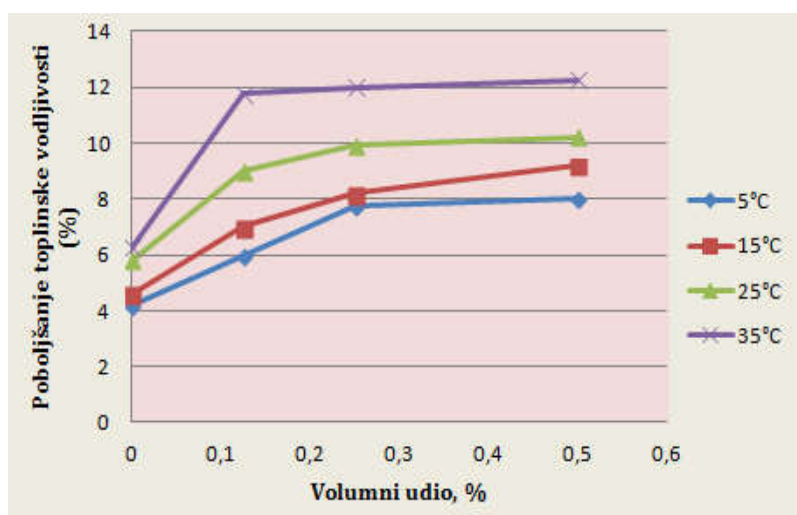
Svojstvo	Voda	PAG	Cu	TiO <sub>2</sub>	SiC	CNT
Gustoća 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	998	1073	8940	4230	3100	1300
Toplinska vodljivost [W/(m·K)]	0,6	0,161	401	11,7	120	3000
Specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]	4,187	2,017	0,39	0,71	0,75	0,71
Vrelište [°C]	100	100	2562	3287	2700	4027

\*Napomena: PAG – polialkilen glikol , CNT – carbon nanotubes

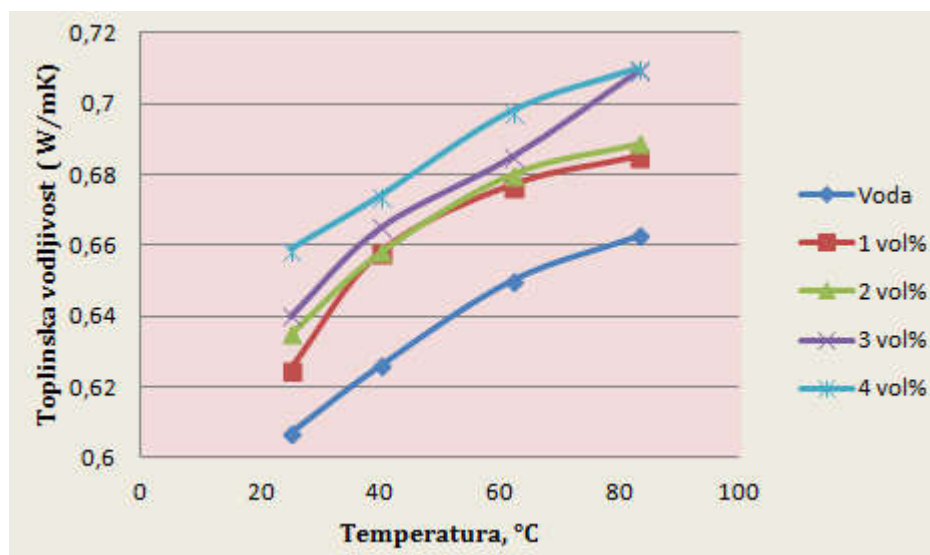


### 3.3. TOPLINSKA VODLJIVOST

Dodavanjem nanočestica osnovnom fluidu se izrazito poboljšavaju toplinska svojstva. Jedno od njih je i toplinska vodljivost. Toplinska vodljivost ili toplinska provodnost  $\lambda$  je fizikalno svojstvo koje nam govori o sposobnosti materijala da provodi i prenosi toplinu. Stoga se toplinska vodljivost može definirati kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka  $1 \text{ m}^2$  i debljine  $1 \text{ m}$  okomito na njegovu površinu pri razlici temperature  $1 \text{ K}$ . Dosadašnja istraživanja uočila su da dodavanje nanočestica može izazvati poboljšanje toplinske vodljivosti i do nekoliko stotina posto [11,13]. Toplinska vodljivost nanofluida ovisi o mnogo čimbenika: veličina, oblik i koncentracija nanočestica, temperatura, pH – razina, stabilnost nanofluida - dodatak surfaktanata (tvari koje snizuju površinsku napetost), omjer površine i volumena nanočestica, disperzija nanočestica, toplinska svojstva osnovnog fluida i nanočestica. Što je veličina nanočestica veća i što je njihov udio u osnovnom fluidu veći, to će toplinska vodljivost biti bolja. Toplinska vodljivost također raste i povećanjem stabilnosti nanofluida. Drugim riječima, što je disperzija nanočestica bolja, nanofluid će bolje provoditi toplinu. Jasno je kako na toplinsku vodljivost nanofluida utječu toplinska vodljivost osnovnog fluida i toplinska vodljivost nanočestica, ali vrlo veliki omjer površine i volumena nanočestica, tj. velika efikasna površina nanočestica predstavlja glavni razlog zbog čega nanofluidi imaju poboljšanu toplinsku vodljivost. Iz **Tablice 2.** se jasno vidi kako je toplinska vodljivost krutina znatno veća od toplinske vodljivosti tekućina.



**Slika 19.** Ovisnost toplinske vodljivosti o volumnom udjelu nanočestica (nanočestice srebra u vodi) [11]



Slika 20. Ovisnost toplinske vodljivosti o temperaturi [11]

Tablica 3. Toplinska vodljivost (TC – thermal conductivity) nanofluida [11]

	Čestice	Osnovni fluid	Prosječna veličina čestica	Volumni udio (%)	Poboljšanje TC (%)
Metalni nanofluidi	Cu	Etilen glikol	10nm	0,3	40
	Cu	Voda	100nm	7,5	78
	Fe	Etilen glikol	10nm	0,55	18
	Au	Voda	10-20nm	0,026	21
	Ag	Voda	60-80	0,001	17
Nemetalni nanofluidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Voda	13nm	4,3	30
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Voda	33nm	4,3	15
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Voda	68nm	5	21
	CuO	Voda	36nm	3,4	12
	CuO	Voda	50nm	0,4	17
	SiC	Voda	26nm	4,2	16
	TiO <sub>2</sub>	Voda	15nm	5	30
	MWCNT*	Sintetičko ulje	25nm	1	150
	MWCNT*	Etilen glikol	15nm	1	13
	MWCNT*	Voda	15nm	1	7
	MWCNT*	Voda	100nm	0,6	38

\*Napomena: MWCNT – multi walled carbon nanotubes

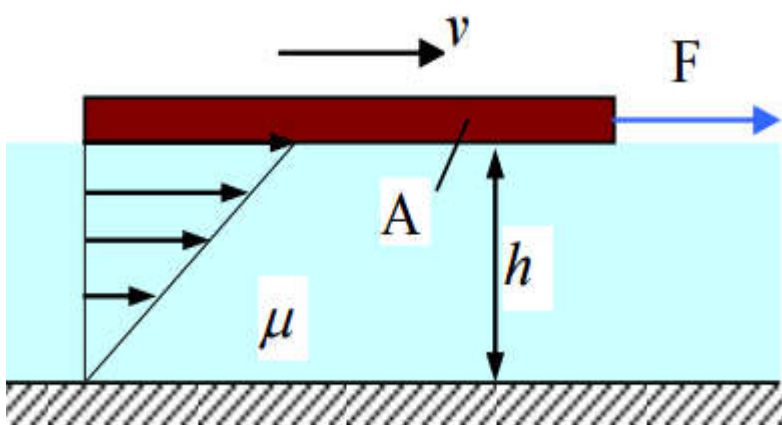
Kako nema definirane teoretske osnove koja bi objasnila ovakva povećanja toplinskih svojstava fluida, predloženo je nekoliko mehanizama koji doprinose porastu [14]:

- 1) Brownovo gibanje čestica – pojava koja opisuje gibanje čestica na molekularnoj i razini nano veličina. Smatra se jednim od glavnih mehanizama koji opisuju toplinska svojstva koloidnih otopina nanočestica i baznog fluida. Gibanje nanočestica u fluidu rezultira mnogobrojnim sudarima čestica i molekula fluida koje prenose energiju. Ovakvo gibanje je izrazito ovisno o temperaturi fluida - na višim temperaturama prijenos topline je efikasniji. Premda je nekoliko istraživača pokazalo da Brownovo gibanje čestica nije glavni nositelj porasta toplinskih svojstava fluida ono se ubraja među značajnije mehanizme. Samostalno, taj mehanizam nije dovoljan za opisati povećanje toplinske vodljivosti.
- 2) Slojevi fluida oko nanočestica – pravilno raspoređeni slojevi molekula fluida oko čestice tvore nanosloj svojstvima sličnim krutom filmu. Taj sloj djeluje kao toplinski most između nanočestica i baznog fluida koji ih okružuje, te se smatra važnim čimbenikom u povećanju toplinske vodljivosti nanofluida. Povećanjem ovog sloja direktno se utječe na toplinsku vodljivost, a veličina tog sloja izravno ovisi o veličini čestice. Smanjenjem veličine čestice i povećanjem međusloja stvara se osnova za kontroliranu izmjenu toplinskih svojstava nanofluida. Usprkos tome, istraživanje je pokazalo da ni ovaj mehanizam samostalno nije odgovoran za poboljšana toplinska svojstva.
- 3) Prijenos topline u nanočesticama – kod čestica manjeg promjera prijenos topline difuzijom više nije primjenjiv nego se promatra balistički tip prijenosa koji je realističniji. Balistički model uključuje višestruko rasipanje na sučelju krutine i fluida. Takvo ponašanje je ključni element u pretvorbi iz brzog prijenosa topline kroz česticu u povećanu toplinsku vodljivost nanofluida. Tim istraživanjem je pretpostavljeno da su čestice znatno bliže jedna drugoj radi Brownovog gibanja i time povećavaju koherentnost prijenosa topline među njima.

- 4) Aglomeracija nanočestica – uslijed Brownovog gibanja i Van der Waalsovih sila dolazi do aglomeriranja nanočestica u strukture koje imaju manji toplinski otpor. Kod malog udjela nanočestica u koloidu može doći do suprotnog efekta – stvaranjem aglomerata ostaje relativno veliki volumen fluida bez prisustva čestica, a time i smanjene toplinske vodljivosti. U svrhu što uspješnijeg dispergiranja čestica u fluidu u istraživanjima se koriste ultrazvučne kupke i sonde te površinski aktivne tvari kako bi se postigao što ujednačeniji raspored čestica i smanjila mogućnost nastanka aglomerata. Eksperimentima se pokazalo da postoji optimalna razina aglomeracije kojom se postiže maksimalna toplinska vodljivost nanofluida.

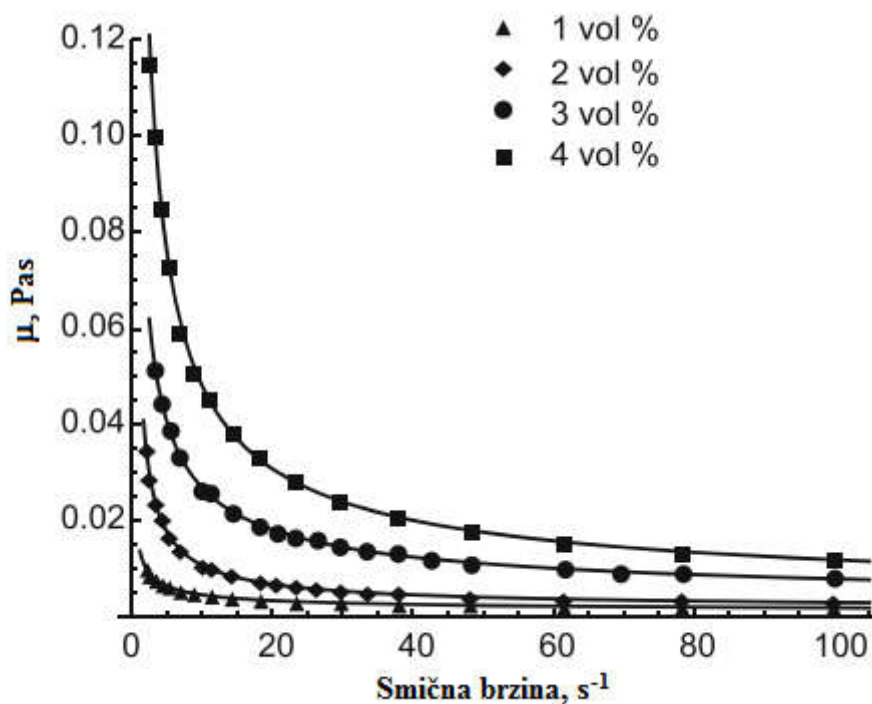
### 3.4. VISKOZNOST (UNUTARNJE TRENJE)

Viskoznost je fizikalno svojstvo fluida, zavisno o termodinamičkom stanju fluida, koje pokazuje otpor fluida ka tečenju. Stoga se može reći kako je viskoznost mjera otpora tečenju fluida. U njutnovskim fluidima viskozna naprezanja su linearno razmjerna brzini deformacije fluida. Koeficijent razmjernosti naziva se dinamička viskoznost fluida  $\mu$  i definira se kao omjer smičnog naprezanja u fluidu i smične brzine. Kinematička viskoznost je definirana kao omjer dinamičke viskoznosti i gustoće fluida [15].



**Slika 21.** Newtonov zakon viskoznosti [15]

Dinamička viskoznost je važan čimbenik u prijenosu topline zbog svog utjecaja na toplinska svojstva i gibanje fluida. Ovisno o količini dodanih nanočestica nanofluidi pokazuju svojstvo njutnovskih (viskoznost je konstantna s promjenom smične sile) ili ne-njutnovskih fluida (viskoznost se mijenja s promijenom smične sile, tj. ovisi o gradijentu brzine i gradijentu tlaka). Dinamička viskoznost može se mijenjati promjenom udjela čestica i temperaturom fluida. Povećanjem vrijednosti temperature fluida vrijednosti dinamičke viskoznosti se snižavaju, a povećanjem udjela nanočestica viskoznost nanofluida se povećava. Izniman porast viskoznosti nanofluida može u potpunosti izmijeniti svojstva procesa pa je zato izrazito bitno kontrolirati njenu vrijednost količinom dodanih čestica, oblikom čestica i njihovim aglomeriranjem te temperaturom fluida ukoliko je to moguće. **Slika 22.** prikazuje ponašanje nanofluida (nanočestice grafita u emulziji) u ovisnosti o smičnoj brzini. Može se vidjeti kako veći udio nanočestica u emulziji rezultira većom dinamičkom viskoznosti. Porastom smične brzine viskoznost se smanjuje – pri malim smičnim brzinama prisutan je veliki pad vrijednosti dinamičke viskoznosti dok pri višim brzinama dinamička viskoznost postaje ~ konst. [16]

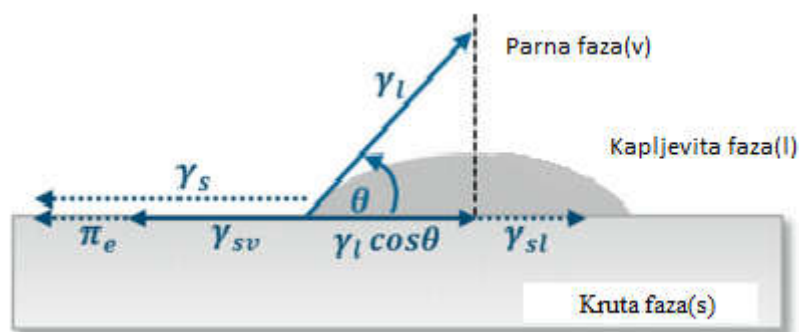


**Slika 22.** Utjecaj koncentracije nanočestica na dinamičku viskoznost [16]

### 3.5. POVRŠINSKA NAPETOST

Površinska napetost je fizikalno svojstvo koje ima znatan utjecaj na ponašanje nanofluida. Površinska napetost se definira kao sila koja djeluje na površini tekućine po jedinici duljine površine okomite na tu silu. U unutrašnjosti tekućine suma sila koje djeluju na pojedinu molekulu jednaka je nuli, dok su na površini molekule izložene nejednakim silama s vanjske i unutarnje strane tekućine. Kada je tekućina u dodiru s plinom, privlačne sile među molekulama tekućine jače su od sila između molekula tekućine i plina, pa su molekule tekućine na površini privučene prema unutrašnjosti, odnosno sila među molekulama na površini tekućine veća je od sile među molekulama u unutrašnjosti.

Dodavanje nanočestica slabo utječe na površinsku napetost baznog fluida, ali zato primjena površinski aktivnih tvari bitno mijenja svojstva. Površinski aktivne tvari su organski spojevi koji samnjuju površinsku napetost između dvije tekućine ili između tekućine i krutine. Inače se dodaju radi povećanja stabilnosti, tj. boljeg dispergiranja čestica u baznom fluidu [8]. Porastom koncentracije čestica i temperature površinska napetost fluida se smanjuje.



**Slika 23.** Određivanje kontaktnog kuta i površinske napetosti fluida na obratku [8]

Veoma važan čimbenik predstavlja kvašenje (močenje, oplahivanje) površine obratka. Kontaktni kut  $\theta$  je mjera kojom se opisuje kvaliteta močenja površine i definira se kao kut koji zatvara tangenta povučena na rub kapi tekućine koja se nalazi na nekoj čvrstoj površini iz trojne točke kontakta triju faza (krute, plinovite i tekuće). Kontaktni kut i površinska napetost fluida smanjuju se dodavanjem nanočestica pa oplahivanje površine ima za posljedicu povećanje brzine ohlađivanja i ravnomjernije odvođenje topline [17].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO 1

### 4.1. PLANIRANJE I IZVOĐENJE POKUSA

#### 4.1.1. Ispitivani nanofluidi

U svrhu istraživanja svojstava nanofluida u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje, provedena su eksperimentalna ispitivanja sa 5%-om emulzijom u koju su dodane nanočestice grafita. Svojstva koja su se ispitivala bila su toplinska vodljivost i dinamička viskoznost. U eksperimentu su se ispitivali čista emulzija te nanofluidi pri udjelima nanočestica 0,5 g/l, 1 g/l i 2 g/l. Temperature na kojima su se provodila mjerenja bile su 20°C (293,15 K), 30°C (303,15 K) i 40°C (313,15 K). Za svaku koncentraciju nanočestica provedeno je 5 ponovljenih mjerenja na svakoj temperaturi. Plan ispitivanja prikazan je **Tablicom 4.**

**Tablica 4.** Vrste ispitivanih fluida

Vrsta medija	Udio nanočestica g/l	Maseni udio g/g	Temperatura nanofluida, °C
Emulzija	-	-	20°C, 30°C, 40°C
Emulzija + nanočestice grafita	0,5	0,0005	
	1	0,001	
	2	0,002	

#### 4.1.2. Priprema nanofluida

U ovome eksperimentalnom radu za pripremu nanofluida korišteni su 5%-na emulzija i nanočestice grafita. Za pripremu same emulzije primjenio se uljni koncentrat Bechem Avantin 320S njemačkog proizvođača Carl Bechem – Bechem Lubrication Technology. Uljni koncentrat Bechem Avantin 320S primjenjuje se u svim postupcima obrade odvajanjem čestica, posebice kod obrade čelika, legura i lijevova [18]. Proizvođač nanočestica je MKnano (dio MK IMPEX korporacije), Kanada. Grafitne nanočestice primjenjivane u ispitivanjima bile su prosječnog promjera 50 nm, čistoće 99,5%, pH – vrijednosti 6-7 i gustoće 2,26 g/cm<sup>3</sup> [19].

Predviđene mase nanočestica grafita određene su na analitičkoj vagi OHAUS Analytical Plus (Slika 24.). Za svaku koncentraciju nanočestica pripremljena je nova suspenzija nanofluida dodavanjem određene koncentracije u 1dl osnovne emulzije.



**Slika 24.** OHAUS Analytical Plus analitička vaga

Prije provođenja pokusa, radi što boljeg dispergiranja nanočestica u osnovnom fluidu provedena je homogenizacija nanofluida u ultrazvučnoj kupci BRANSONIC 220 (Slika 25.) frekvencije 50 kHz i snage 120 W, u trajanju od 30 min.



**Slika 25.** Homogenizacija nanofluida u ultrazvučnoj kupci BRANSONIC 220



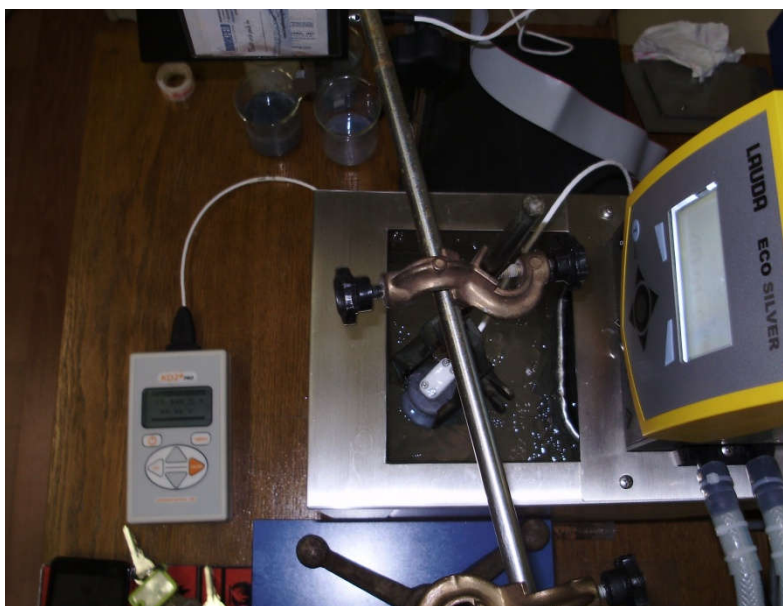
### 4.1.3. Mjerenje toplinske vodljivosti

Pri mjerenju toplinske vodljivosti koristila se metoda vruće žice (eng. Transient hot – wire) i prijenosni mjerni sustav Decagon KD2 Pro (**Slika 26.**). Mjerni sustav Decagon KD2 Pro sastoji se od senzora KS-1, tj. igle dugačke 6 cm i promjera 1,3 mm u kojoj su integrirani grijač i termistor (temperaturno osjetljivi poluvodič) te mikroelektroničkog sklopa koji služi za prihvata i obradu mjernih podataka te prikaz izmjerene toplinske vodljivosti i toplinske otpornosti. Mjerenja se mogu provoditi u rasponima ispitivanog medija od 223,15 K do 423,15 K. Raspon mjerenja toplinske vodljivosti kreće se od 0,02 do 2,00 W/mK. Preciznost mjerenja toplinske vodljivosti je  $\pm 5 \%$  za područje mjerenja od 0,2 do 2 W/mK, a  $\pm 0.01 \%$  W/mK za područje mjerenja od 0,02 do 0,2 W/mK [20]



**Slika 26.** Decagon KD2 Pro [20]

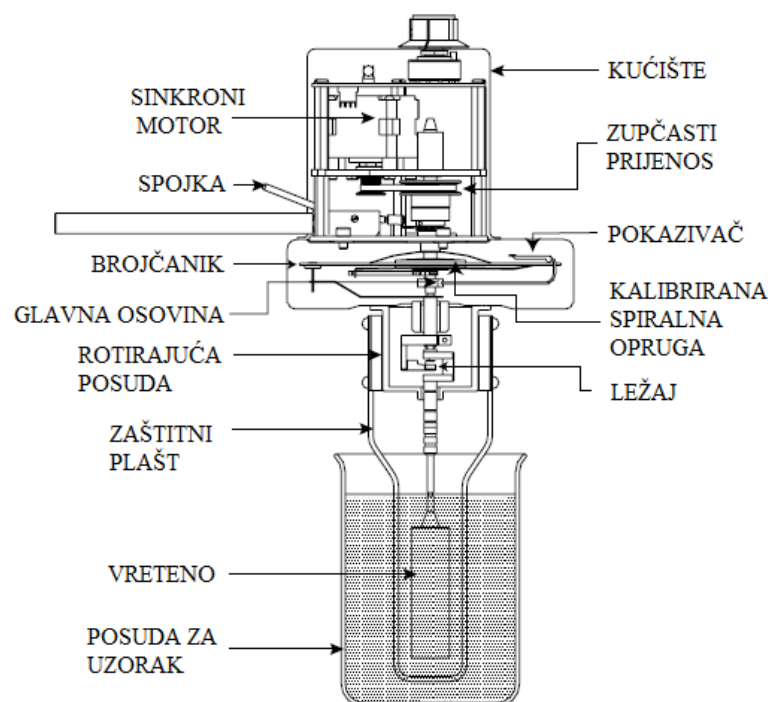
Ispitivanja su se provodila u termostatisanoj kupelji LAUDA ECO RE 415 (**Slika 27.**). Ispitni uzorak bio je uronjen u termostatisanu kupelj i zagrijan na traženu temperaturu. Nakon što se zadana temperatura postigne, termostatisana kupelj se isključi te se pomoću mjernog sustava Decagon KD2 Pro provodi mjerenje toplinske vodljivosti i toplinskog otpora.



**Slika 27.** Termostatirana kupelj LAUDA ECO RE 415

#### 4.1.4. Mjerenje dinamičke viskoznosti

Za ispitivanje dinamičke viskoznosti koristio se rotacijski reometar BROOKFIELD DV - III ULTRA . BROOKFIELD radi na principu mjerenja torzije potrebne za rotaciju vretena u fluidu. Vreteno je pogonjeno motorom uz pomoć kalibrirane opruge. Viskoznost se mjeri korištenjem različitih brzina prijenosa i izmjenjivih vretena. Viskometar se sastoji od nekoliko mehaničkih podsklopova. Glavno kućište sadrži kalibriranu berilij-bakrenu oprugu, koja je spojena na glavnu osovinu i brojčanik. Brojčanik je pogonjen osovinom pogonskog motora, a zauzvrat pogoni glavnu osovinu kroz kalibriranu oprugu. Pokazivač je povezan s glavnom osovinom i pokazuje kut u odnosu na brojčanik. Ispod glavnog kućišta nalazi se rotirajuća osovina kroz koju prolazi glavna osovina. Ležaj se, unutar rotirajuće posude, rotira s brojčanicom ili pretvornikom. Donji dio glavne osovine sadrži spojku vretena na koju se spajaju vretena viskometra [21]. Ispitivanje dinamičke viskoznosti nanofluida na određenim temperaturama također je provedeno u termostatiranoj kupelji (**Slika 29.**). Za svaku koncentraciju nanočestica i na svakoj zadanoj temperaturi su se očitavale vrijednosti dinamičke viskoznosti dobivene za iznos smične brzine od  $50 \text{ s}^{-1}$  i  $100 \text{ s}^{-1}$ .



**Slika 28.** Shematski prikaz rada BROOKFIELD - ovog reometra [22]



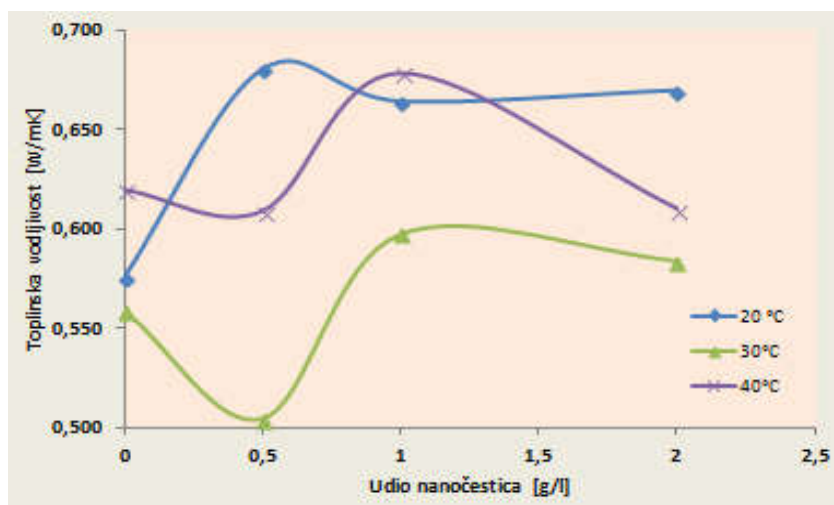
**Slika 29.** BROOKFIELD - ov reometar i termostatisirana kupelj

## 4.2. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA

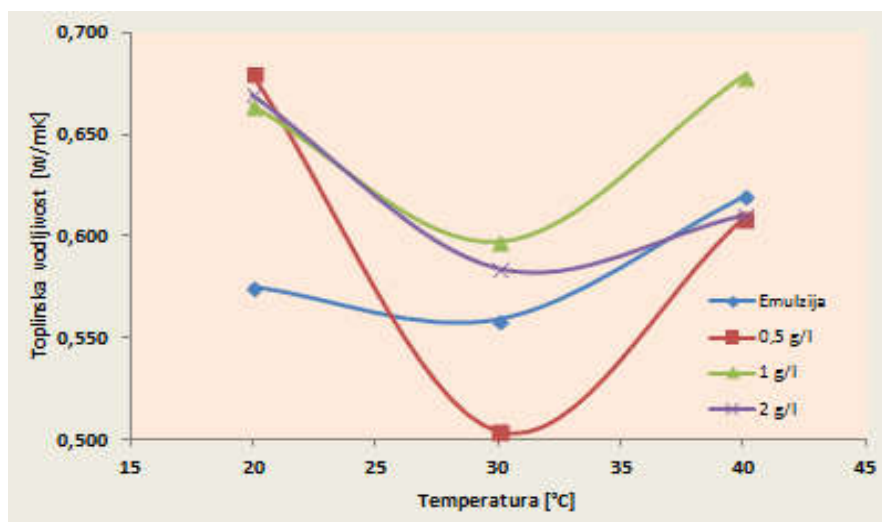
Nakon provedenih mjerenja dobiveni rezultati zapisani su u tabličnom obliku u programu „Microsoft Office Excel 2007“. Na temelju dobivenih rezultata konstruirani su dijagrami ovisnosti toplinske vodljivosti, relativne toplinske vodljivosti i dinamičke viskoznosti o udjelu nanočestica i temperaturi nanofluida. Konstruirani su i posebni dijagrami gdje se na ordinati nalazi omjer toplinske vodljivosti i viskoznosti, koji nam govori o tome koliko se poboljšala efikasnost odvođenja topline dodavanjem nanočestica.

### 4.2.1. Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti

**Slike 30.** i **31.** grafički prikazuju dobivene rezultate mjerenja, tj. govore o tome kako se toplinska vodljivost mijenja u ovisnosti o koncentraciji nanočestica i temperaturi nanofluida. Iz **Slike 30.** vidljivo je kako dodatak 1 g/l nanočestica grafita osnovnoj emulziji predstavlja optimum u pogledu postignute toplinske vodljivosti. Nadalje, dodatkom 0,5 g/l toplinska vodljivost opada pri 30°C (veliki pad) i 40°C, dok je tek 20°C iznimka. Dodatak 2 g/l grafitnih nanočestica pri 20°C pokazuje veliki porast toplinske vodljivosti u odnosu na čistu emulziju, ali daljnjim povećavanjem temperature vrijednosti toplinske vodljivosti postaju približno slične vrijednostima za čistu emulziju. Graf ovisnosti toplinske vodljivosti o temperaturi (**Slika 31.**) jasno pokazuje kako vrijednosti toplinske vodljivosti značajno opadaju na 30°C te nakon toga počinju rasti.

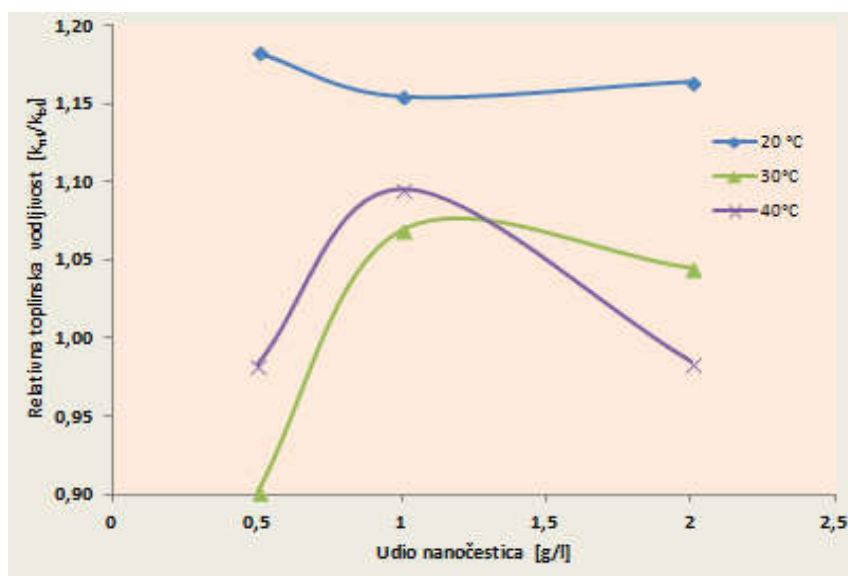


**Slika 30.** Dijagram ovisnosti toplinske vodljivosti o koncentraciji nanočestica



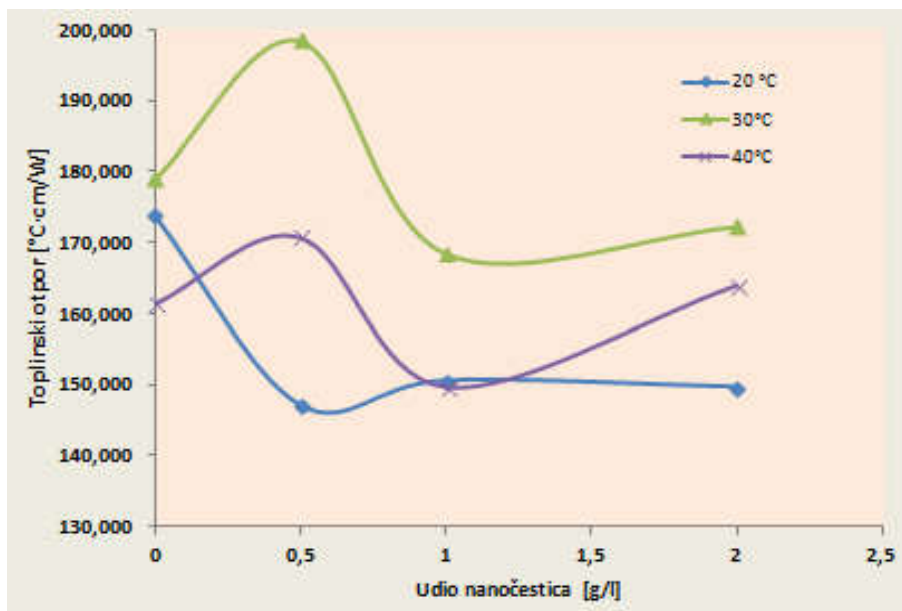
**Slika 31.** Dijagram ovisnosti toplinske vodljivosti o temperaturi nanofluida

**Slika 32.** predočava kako se relativna toplinska vodljivost mijenja s promjenom udjela nanočestica u osnovnoj emulziji. Relativna toplinska vodljivost je omjer toplinske vodljivosti nanofluida i toplinske vodljivosti čiste emulzije, naravno na istoj temperaturi. Ta nam veličina govori koliko se toplinska vodljivost osnovnog fluida poboljšala dodatkom nanočestica. Npr. iznos relativne toplinske vodljivosti nanofluida sa udjelom 0,5 g/l na temperaturi 20°C je 1,18 što znači da se toplinska vodljivost osnovnog fluida poboljšala dodatkom nanočestica (udio 0,5 g/l) povećala za 18%. Vidljivo je kako dodatak 1 g/l daje najbolje rezultate – na 20°C povećanje toplinske vodljivosti za ~15%, na 30°C povećanje ~5% i na 40°C povećanje ~10%.



**Slika 32.** Dijagram ovisnosti relativne toplinske vodljivosti o koncentraciji nanočestica

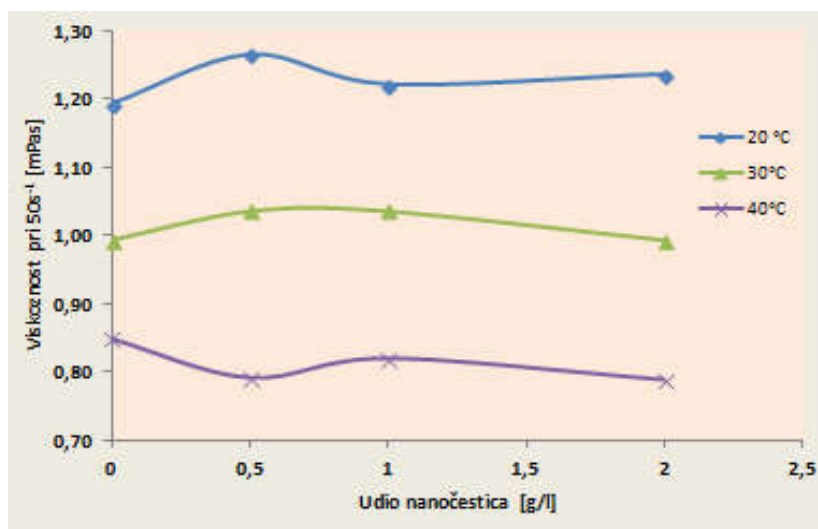
**Slika 33.** prikazuje promjenu toplinskog otpora s promjenom koncentracije grafitnih nanočestica. Ovaj graf je samo obrnuti prikaz grafa toplinska vodljivost – udio nanočestica. Vidljivo je kako su toplinski otpori najmanji za slučaj kada se osnovnoj emulziji dodao 1 g/l grafitnih nanočestica, što se slaže sa rezultatima prikazanim na **Slici 30**.



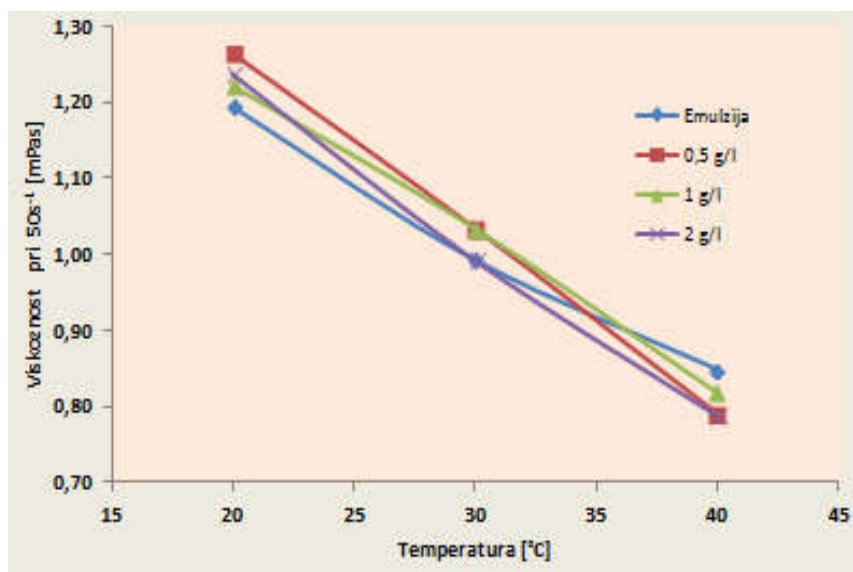
**Slika 33.** Dijagram ovisnosti toplinskog otpora o koncentraciji nanočestica

#### 4.2.2. Rezultati mjerenja dinamičke viskoznosti

Dijagrami ovisnosti dinamičke viskoznosti o koncentraciji nanočestica i temperaturi nanofluida izrađeni su za vrijednosti dinamičke viskoznosti dobivene pri smičnoj brzini od  $50 \text{ s}^{-1}$ . Sa **Slike 34.** moguće je zamijetiti kako na temperaturama  $20^\circ\text{C}$  i  $30^\circ\text{C}$  dodavanjem nanočestica viskoznost blago raste u odnosu na čistu emulziju, dok na temperaturi  $40^\circ\text{C}$  dodatkom nanočestica dinamička viskoznost blago opada. Na **Slici 35.** je jasno vidljivo kako dinamička viskoznost značajno opada porastom temperature.



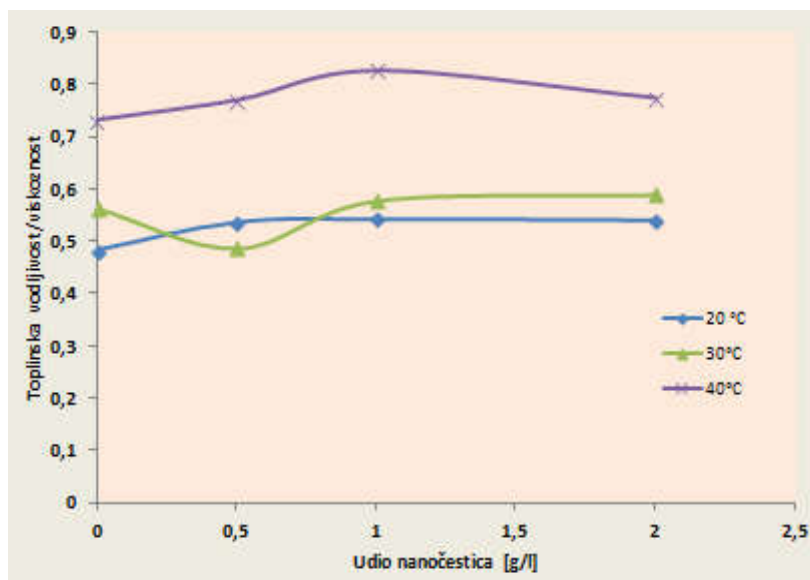
**Slika 34.** Dijagram ovisnosti dinamičke viskoznosti o koncentraciji nanočestica



**Slika 35.** Dijagram ovisnosti dinamičke viskoznosti o temperaturi nanofluida



Dijagram na **Slici 36.** prikazuje ovisnost omjera toplinska vodljivost/viskoznost o dodanim nanočesticama grafita. Omjer toplinske vodljivosti i dinamičke viskoznosti nam govori koliki je doprinos dodanih nanočestica toplinskoj vodljivosti a da pritom ne dođe do značajnog povećanja viskoznosti pripremljenog fluida, tj. taj nam omjer govori koliko se dodavanjem nanočestica poboljšala efikasnost odvođenja topline. Problem se javlja zbog toga što mogući porast viskoznosti dodavanjem nanočestica može negativno utjecati na dinamiku fluida, tj. fluid porastom viskoznosti postaje tromiji i slabije odvodi toplinu. Značajno povećanje viskoznosti značilo bi aglomeraciju nanočestica te nestabilnost pripremljenog nanofluida i brzu sedimentaciju čestica. Iz rezultata prikazanih na dijagramu vidljivo je kako je omjer toplinska vodljivost/viskoznost za sve pripremljene nanofluide na svim mjerenim temperaturama ostao približno jednak ili neznatno veći od omjera za čistu emulziju što znači da su dodani udjeli nanočestica dovoljno maleni i pripremljeni nanofluid je homogen.



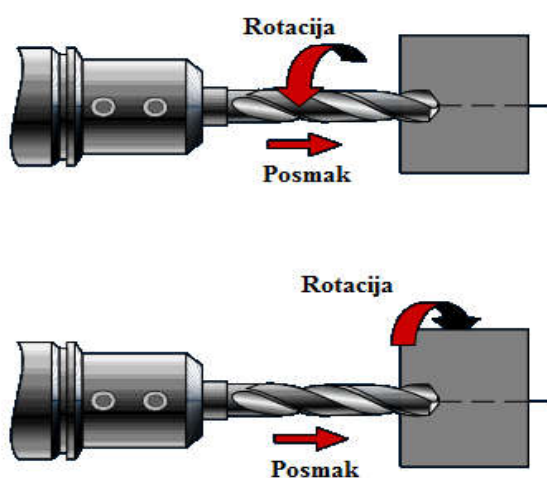
**Slika 36.** Dijagram - omjer vodljivost/viskoznost u ovisnosti o koncentraciji nanočestica

Na temelju rezultata mjerenja toplinske vodljivosti i dinamičke viskoznosti može se zaključiti kako dodavanjem grafitnih nanočestica toplinska vodljivost pokazuje tendenciju rasta, dok je dinamička viskoznost za sve udjele nanočestica približno jednaka. Ovakvi rezultati stoga pokazuju dobar potencijal pripremljenih nanofluida u pogledu smanjenja sila razanja i reduciranja trošenja alata kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Detaljno ispitivanje utjecaja dodavanja nanočestica osnovnoj emulziji s ciljem reduciranja sila razanja kod postupka bušenja biti će predstavljeno u eksperimentalnom dijelu 2.



## 5. BUŠENJE

Bušenje je postupak koji se upotrebljava za izradu provrta manjih promjera (5 – 10 mm) ili proširivanje provrta većih promjera. Karakterizira se kao vrlo česta, a i dugotrajna operacija kod koje alat kružnim gibanjem prodire u materijal obratka te odvaja sloj materijala određene debljine kako bi se postigao traženi promjer i kvaliteta površine obratka. Bušenje se izvodi na različitim vrstama alatnih strojeva (pretežno bušilice) pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano dok je posmično gibanje pravocrtno kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom. Ukoliko se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Bušenje karakterizira mala krutost sustava, otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP – a, promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice te promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice [4]. Mala krutost sustava uzrokovana je velikim omjerom između dužine svrdla i njegovog promjera. U većini slučajeva svrdla imaju veliki omjer između dužine i promjera. To je posebno izraženo kod svrdla za duboko bušenje . Otežano odvođenje odvojene čestice i otežan dovod SHIP -a uzrokovani su time što je promjer provrta jednak promjeru svrdla. Stoga se odvođenje odvojene čestice može obavljati samo kroz žlijebове svrdla. Bušenje je jedan od najzastupljenijih postupaka obrade odvajanjem čestica, a to se očituje iz niza prednosti od kojih su najznačajnije: moguća primjena postupka i kod raznovrsnih oblika geometrije obratka, postupak primjenjiv za gotovo sve materijale, ostvarivanje veoma uskih tolerancija i specifičnih kvaliteta obrađene površine, moguća primjena kod različitih veličina serije proizvoda [5].



**Slika 37.** Bušenje – kinematika [1]

## 5.1. ALATI ZA BUŠENJE

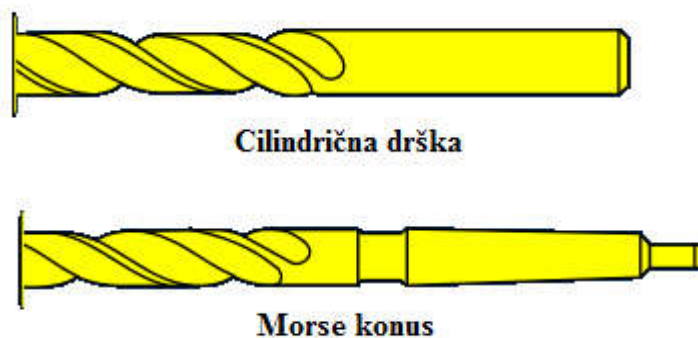
Svrkla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Bušni alati ili svrdla mogu se podijeliti na sljedeći način :

- spiralna svrdla
- svrdla za središnje uvrte
- posebna svrdla za duboko bušenje [4].

Spiralna svrdla najčešća su svrdla koja se upotrebljavaju za izradu provrta, a sastoje se od reznog i steznog dijela. Stezni dio služi za prihvatanje svrdla i za prijenos okretnog momenta, a može biti cilindričnog oblika koji je najčešći kod manjih svrdla i svrdla za ručno bušenje ili konusnog oblika kod svrdla za strojnu obradu. Rezni dio spiralnog svrdla sastoji se od prednje površine, stražnje površine, glavne oštrice (spoj prednje i stražnje oštrice), utora za odvođenje čestica i za dovod sredstva za hlađenje, poprečne ili nulte oštrice. Samo tijelo radnog dijela spiralnog svrdla također se izvodi konusno, a svrha toga je smanjenje trenja između alata i obratka.



Slika 38. Spiralno svrdlo [23]



Slika 39. Podjela spiralnih svrdla prema izvedbi drške [1]

### 5.1.1. Geometrijski parametri reznog dijela alata

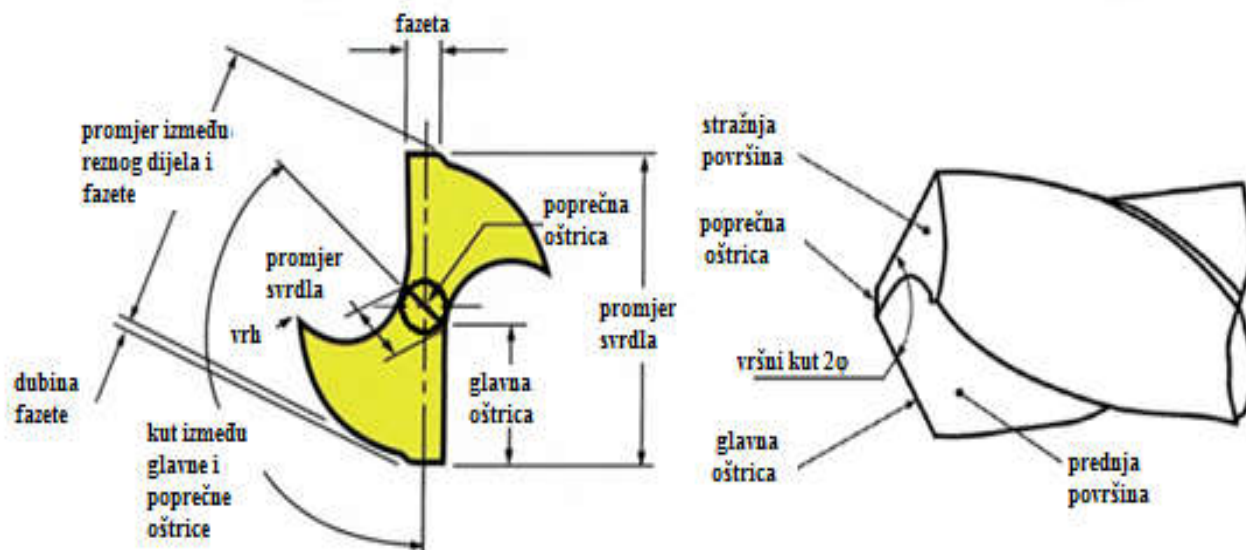
**Glavna oštrica svrdla** - nastaje presjekom konvolutne zavojne plohe i stražnje površine koja je dio plohe stošca.

**Poprečna oštrica** - nastaje presjekom dva stošca čiji su vrhovi na suprotnim stranama odnosno radi se o liniji koja se dobije presijecanjem dvaju stražnjih površina. Općenito poprečna oštrica čini 15% ukupne dužine oštrice, a na njoj djeluje do 65% aksijalne sile u ovisnosti o promjeru svrdla. Kut na poprečnoj oštrici je negativan i kreće se od  $48-55^\circ$ , te tu dolazi do trganja i izbacivanja materijala.

**Kut vrha svrdla  $2\varphi$**  - kut što ga zatvaraju dvije glavne rezne oštrice. Ovaj kut odabire se prema materijalu obratka, zato što vrši važan utjecaj na prednji geometrijski kut  $\gamma$ , stražnji geometrijski kut  $\alpha$ , kao i na otpornost jezgre svrdla. S povećanjem kuta  $2\varphi$  povećava se i otpor rezanja, a sukladno tome povećava se naprezanje svrdla na uvijanje i izvijanje. Kod tvrdih materijala on iznosi:  $2\varphi = 120^\circ - 140^\circ$ , a kod mekših materijala (npr. Al i Cu legure) je  $2\varphi = 80-110^\circ$ .

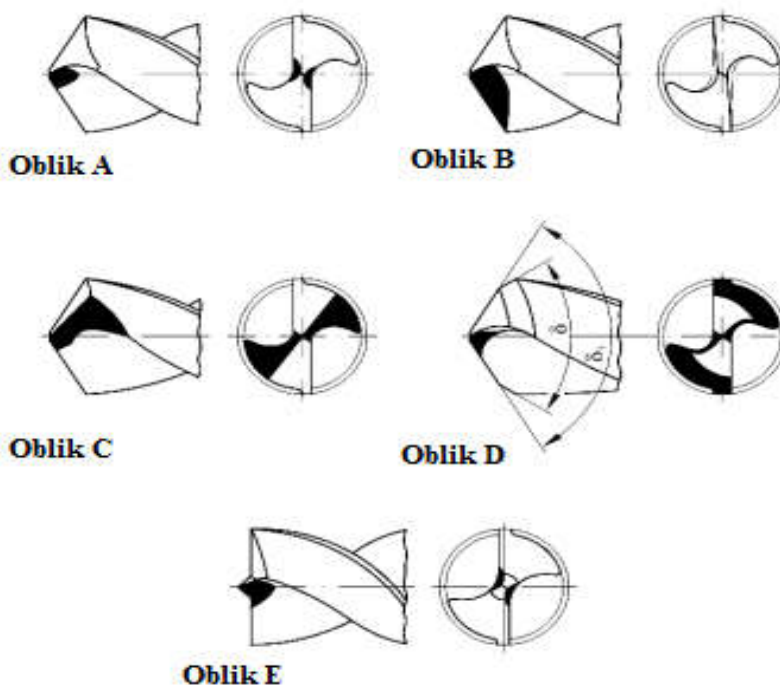
**Kut zavojnice utora  $\omega$**  - kut između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu prednjeg geometrijskog kuta  $\gamma$ . Povećavanjem kuta zavojnice  $\omega$  povećava se kut  $\gamma$ , čime se poboljšavaju uvjeti rezanja, smanjuje moment uvijanja kao i otpori rezanja. Pritom se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice, pogotovo ako se radi o svrdlima manjeg promjera. Normalni kut zavojnice utora je  $30^\circ$ , dok se za tvrde materijale on uzima približno  $40^\circ$ , a za plastične materijale  $13^\circ$ .

**Kut poprečne oštrice  $\psi$**  - kut što ga zatvara poprečna oštrica s ravninom, koja prolazi glavnom oštricom paralelno sa smjerom osi svrdla. Ovaj je kut mjerodavan da se utvrdi, da li podbrušene površine imaju traženi oblik, a podbrušeni kutevi ispravne vrijednosti. Kut poprečne oštrice daje veću posmičnu silu što sve skupa dovodi do većeg utroška snage i vremena rada.



Slika 40. Geometrija spiralnog svrdla [23]

#### VRSTE BRUŠENJA VRHA SVRDLA PREMA DIN 1412



Slika 41. Podjela svrdla prema geometriji oštrice [5]

### 5.1.2. Materijali za izradu svrdla

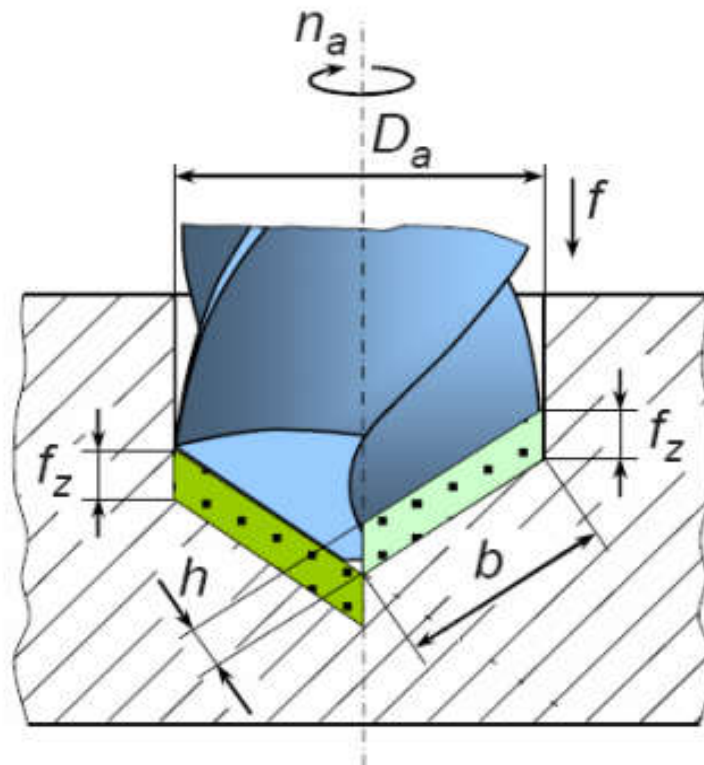
Rezni dio svrdla izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od obrađivanog materijala, a najčešće se koriste brzorezni čelik i tvrdi metal. Osnovni materijali koji se koriste pri izradi svrdla su:

- ugljični alatni čelici
- legirani alatni čelici - Cr alatni čelici, W alatni čelici, CrV alatni čelici, ...)
- brzorezni čelici (High Speed Steel) – spadaju pod visokolegirane čelike, legirajući elementi su Cr, W, Mo, V, Co
- rezna keramika – dobivena postupkom sinteriranja; oksidna i neoksidna; velika tvrdoća i postojanost pri visokim temperaturama (1300 - 1400°C)
- tvrdi metal – sinterirani materijal koji se sastoji od karbida (W, Ti, Ta, Nb, Mo) i vezivne metalne osnove, najčešće kobalta (Co)
- kubični bor nitrid (CBN) – odlična postojanost na povišenim temperaturama, velika tvrdoća i otpornost na trošenje
- polikristalični dijamant (PCD) – visoka tvrdoća i otpornost na trošenje

Osim materijala od kojeg je svrdlo izrađeno danas su u velikoj primjeni i prevlake svrdla od drugih vrsta materijala koje dodatno poboljšavaju svojstva svrdla ovisno o njegovoj primjeni. Nanošenjem prevlaka na osnovni materijal od kojeg je izrađeno svrdlo moguće je povećati postojanost alata čak i do 30 %. Neke od najznačajnijih prevlaka su:

- PVD (Physical Vapour Deposition) – fizikalni postupak prevlačenja iz parne faze pri temperaturi od 500°C, npr. prevlake titan – nitrid (TiN), titan – karbon - nitrid (TiCN), titan – aluminij – nitrid (TiAlN)
- nitriranje – obogaćivanje površinskih slojeva dušikom, tj. nastajanje tankog sloja nitrida (kemijski spoj željeza i dušika)
- oksidno prevlačenje – nanošenje crnog sloja  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , poboljšana toplinska otpornost i podmazivost

## 5.2. PARAMETRI ZAHVATA KOD BUŠENJA



**Slika 42.** Parametri odvojene čestice kod bušenja [5]

Širina odvojene čestice kod bušenja:

$$b = D \frac{1}{2 \sin \varphi}$$

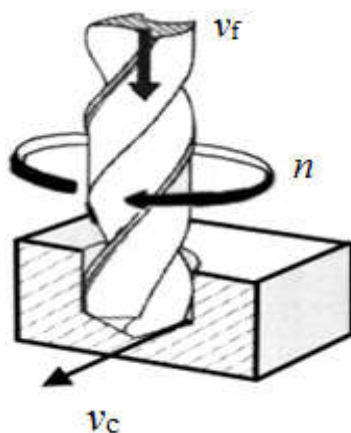
Debljina odvojene čestice koju skida svaka oštrica spiralnog svrdla:

$$h = f_z \cdot \sin \varphi$$

Površina poprečnog presjeka koju skine jedna oštrica:

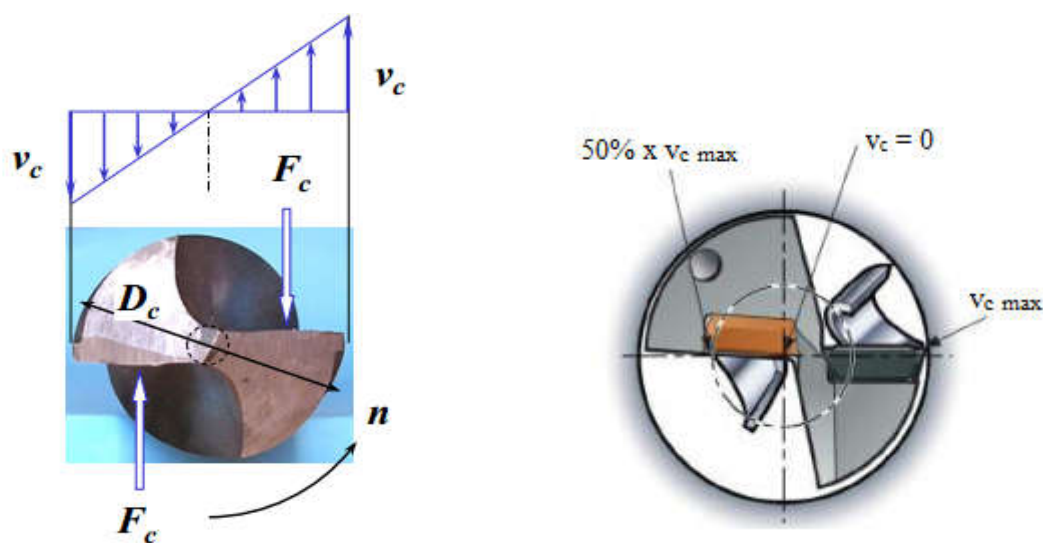
$$A_1 = b \cdot h = \frac{D \cdot f}{4}$$

### 5.3. PARAMETRI BUŠENJA



Slika 43. Bušenje spiralnim svrdlom [4]

Brzina rezanja  $v_c$  (m/min) je obodna brzina na svrdlu, tj. brzina kojom alat obrađuje komad. Glavna brzina rezanja ovisi o materijalu koji se obrađuje, alatu kojim se vrši obrada, hlađenju za vrijeme obrade, posmaku, snazi stroja itd. Kao što je već prije rečeno, postupak bušenja karakterizira promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice. U središnjoj osi svrdla brzina rezanja je jednaka nuli, a prema obodu raste prema svojoj maksimalnoj vrijednosti. Za brzinu rezanja uvijek se uzima maksimalna brzina, jer ona određuje radni vijek trajanja svrdla.



Slika 44. Raspored brzine rezanja duž glavne oštrice [4,24]

Brzina rezanja  $v_c$  računa se prema jednadžbi:

$$v_c = D \cdot \pi \cdot n$$

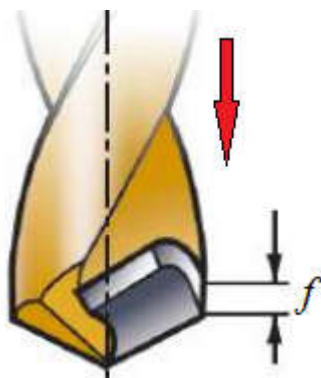
Srednja brzina rezanja jednaka je brzini na radijusu  $D/4$  i iznosi:

$$v_{cm} = \frac{v_c + 0}{2} = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{2} = \frac{v_c}{2}$$

Posmak  $f$  (mm/okr) definira se kao aksijalni pomak koji svrdlo napravi tijekom jednog punog okretaja. Kod bušenja dubokih provrta potrebno je, zbog otežanog odvođenja odvojene čestice i smanjene krutosti svrdla s povećanjem dubine bušenja, smanjiti posmak. Posmak se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$f = f_z \cdot z \quad \text{gdje je: } f_z - \text{posmak po oštrici}$$

$$z - \text{broj oštrica (} z = 2 \text{)}$$



**Slika 45.** Posmak svrdla [24]

Posmična brzina  $v_f$  računa se iz poznatog broja okretaja svrdla i posmaka:

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad \text{gdje je: } n - \text{brzina vrtnje svrdla}$$

Dubina rezanja  $a_p$  se definira kao udaljenost od obrađivane površine do osi svrdla:

$$a_p = \frac{D}{2} \quad \text{gdje je: } D - \text{promjer svrdla}$$



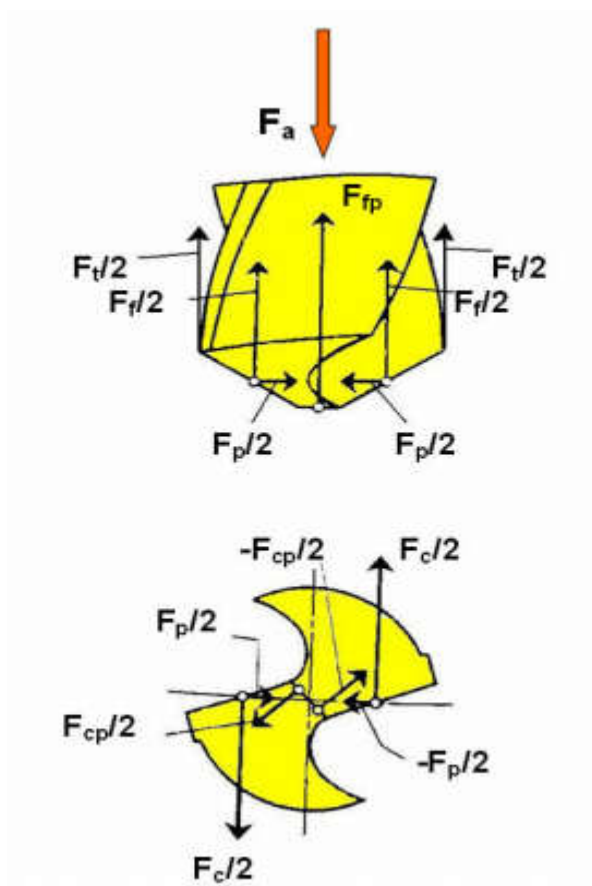
## 5.4. SILE I MOMENTI KOD BUŠENJA

Sila rezanja kojom alat djeluje na obradak pri bušenju određena je silama koje djeluju na svakoj reznjoj oštrici. Kod normalnog, pravilnog rada je kod svih alata poprečni presjek odvojene čestice na svakoj reznjoj oštrici jednak, te su stoga i sile rezanja jednake. Ako se promatra samo jedna oštrica, moguće je silu rezanja rastaviti u tri komponente. Na glavnu oštricu djeluju:

- dvije jednake glavne sile rezanja  $F_c/2$ , ali suprotnog smjera
- dvije jednake i isto usmjerene posmične sile  $F_f/2$
- dvije jednake, ali suprotno usmjerene pasivne sile  $F_p/2$ .

Na poprečnoj oštrici prisutne su:

- dvije jednake, ali suprotno usmjerene glavne sile rezanja na poprečnoj oštrici  $F_{cp}/2$
- posmična sila na poprečnoj oštrici  $F_{fp}$ .



**Slika 46.** Sile rezanja kod postupka bušenja [25]

Uz navedene sile tokom procesa bušenja pojavljuju se na svrdlu i sile trenja  $F_t/2$  koje se generiraju na mjestu dodira svrdla, obrađene površine i odvojenih čestica. Sve sile kojima materijal djeluje u smjeru osi svrdla savladavaju se aksijalnom silom bušenja  $F_a$ , a ona je ekvivalentna:

$$F_a = F_f + F_{fp} + F_t$$

Istraživanja su pokazala da od ukupne aksijalne sile bušenja  $F_a$ :

- oko 45 % otpada na posmične sile glavnih oštrica
- oko 50 % na posmičnu silu poprečne oštrice
- oko 5 % na savladavanje sile trenja

Ukupni moment  $M_u$  kojim je opterećeno svrdlo sastoji se od momenta  $M_{Fc}$  uslijed djelovanja glavnih sila rezanja  $F_c$ , momenta  $M_{Fcp}$  izazvanog glavnim silama rezanja koje se generiraju na poprečnoj oštrici i momenta  $M_t$  koji se javlja uslijed djelovanja sile trenja na rubovima svrdla:

$$M_u = M_{Fc} + M_{Fcp} + M_t$$

Na moment uslijed djelovanja glavnih sila rezanja otpada 80%, na moment uslijed djelovanja glavnih sila rezanja koje se generiraju na poprečnoj oštrici 10% i na moment zbog djelovanja trenja na rubovima svrdla 10%. [25]

Na svaku glavnu oštricu svrdla djeluje glavna sila rezanja  $F_c$  koja se računa prema sljedećem izrazu:

$$F_c = \frac{D \cdot f}{4} \times k_c$$

Zbog djelovanja glavnih sila  $F_c$  i  $(-F_c)$  na približnom rastojanju  $l_h = D/2$  javlja se moment  $M$ :

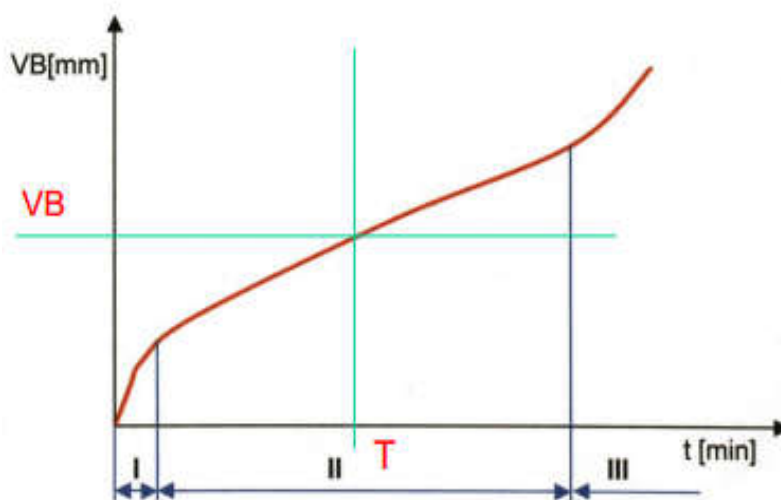
$$M = F_c \cdot \frac{D}{2} = \frac{D^2 \cdot f}{8} \times k_c$$

## 5.5. TROŠENJE I POSTOJANOST SVRDLA

Kod postupaka obrade odvajanjem prisutna su velika opterećenja, velike brzine rezanja i veliko trenje, što rezultira visokim naprezanjima i deformacijama. Sve procese obrade odvajanjem pa tako i bušenje prati trošenje oštrice reznog dijela alata. Trošenje alata, u ovom slučaju svrdla, uzrokovano je prisustvom mehaničkih, toplinskih i kemijskih opterećenja koja se javljaju za vrijeme same obrade. Naime, pri nastajanju odvojene čestice dolazi do plastične deformacije i do generiranja velikih sila rezanja i visokih temperatura na prednjoj i stražnjoj površini alata, što vrlo negativno utječe na postojanost alata, kvalitetu obrađene površine i točnost obrade. Trošenje svrdla, tj. mijenjanje dimenzija i općenito geometrije svrdla može značajno utjecati na funkcionalnost postupka. Kao uzroci trošenja svrdla navode se sljedeći: prevelika ili premala brzina rezanja, prisustvo visokih temperatura, premala krutost, tj. nedovoljno stegnut obradak, , prevelik ili premali posmak, velike dubine bušenja, nedovoljno hlađenje, nagomilavanje odvojene čestice itd.

**Slika 47.** prikazuje tri faze radnog vijeka alata:

- I. faza uhodavanja – pojačano trošenje
- II. faza normalnog trošenja – linearni rast trošenja
- III. faza izrazitog (naglog) trošenja – katastrofalne posljedice za alat



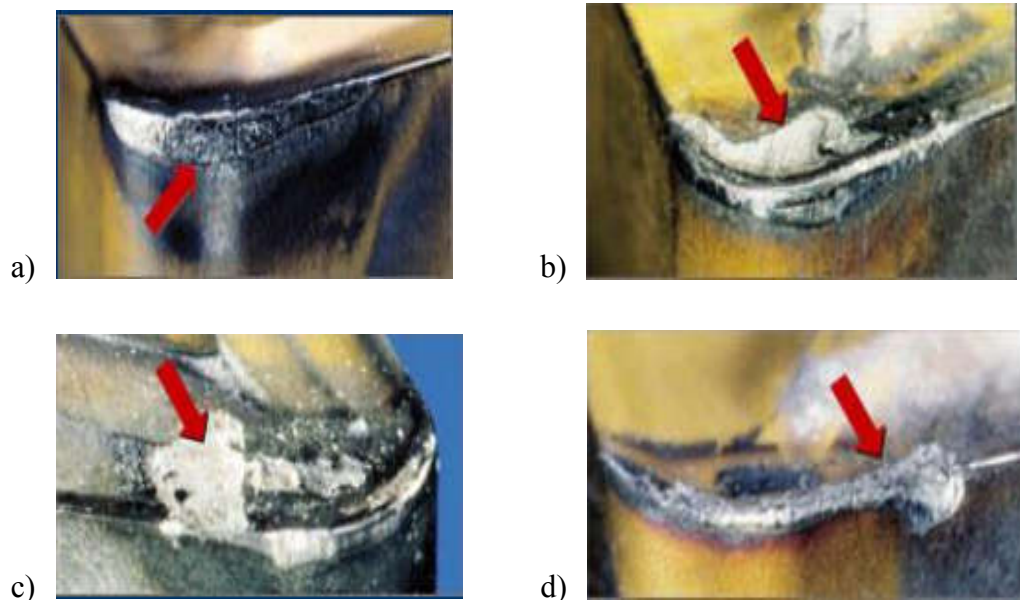
**Slika 47.** Taylorov princip trošenja [4]

Osnovni mehanizmi trošenja alata su:

- adhezija – nastaje kao rezultat djelovanja jakih međumolekulnih sila u dodirnim točkama dvaju tijela pri čemu dolazi do mikrozavarivanja vrhova neravnina. Adhezijsko trošenje je dominantno pri nižim temperaturama i nižim brzinama rezanja
- abrazija - trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Opisuje se kao posljedica prodiranja tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg materijala uz brazdanje pri uzajamnom relativnom gibanju tijela.
- korozija – trošenje koje je posljedica djelovanja kemijskog djelovanja između alata, obratka i okoline. Najizraženiji učinak ovog mehanizma trošenja je na dijelu rezne oštrice gdje završava dodir alata i obratka zbog najlakšeg pristupa zraka
- difuzija - pojava premještanja tvari u plinovitom, tekućem i čvrstom stanju. Pod premještanjem tvari podrazumijeva se kretanje ili zamjena mjesta atoma, iona ili molekula u plinovima, tekućinama ili krutinama.

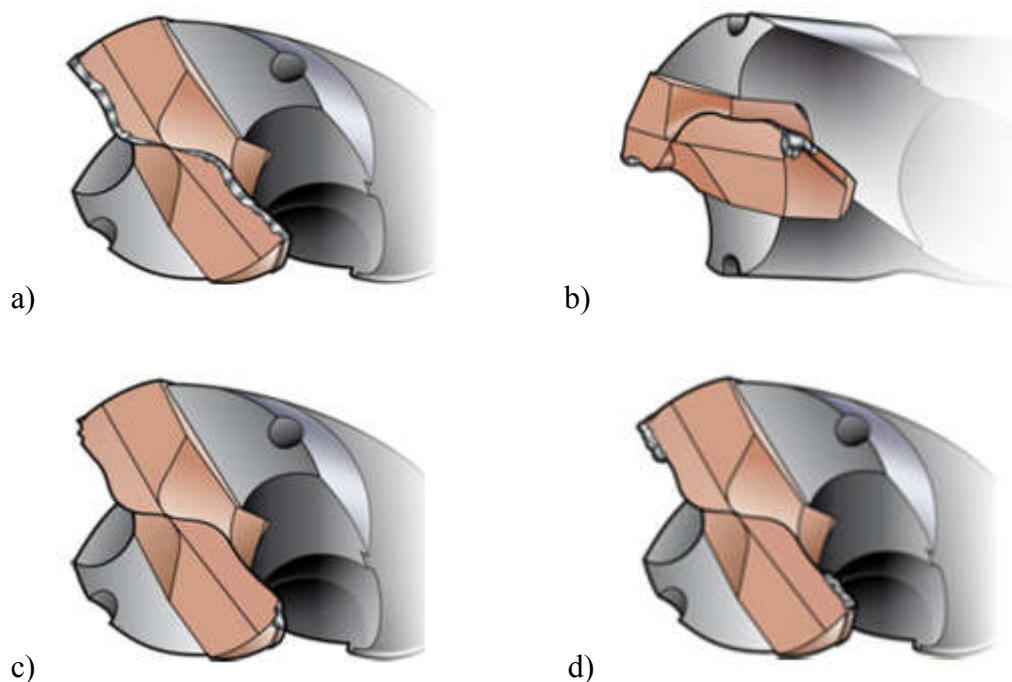
Oblici trošenja reznih alata:

trošenje stražnje površine, trošenje prednje površine (kratersko trošenje), zarezno trošenje, oksidacijsko zarezno trošenje, napljepak (BUE), plastična deformacija, toplinska napuknuća, uzdužna napuknuća, razgradnja oštrice, lom oštrice [1]

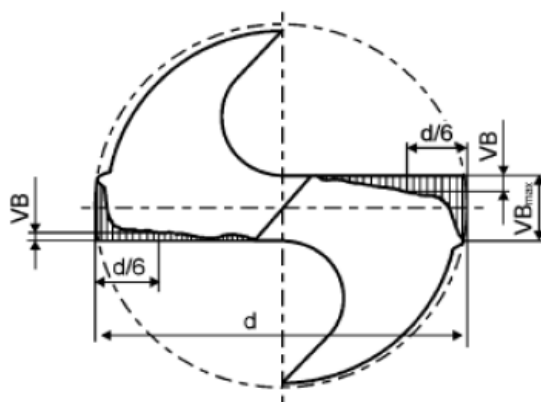


**Slika 48.** Najčešći oblici trošenja: a) trošenje stražnje površine, b) kratersko trošenje, c) naljepak (BUE), d) zarezno trošenje [1]

Ovisno o tome kakvo je trošenje svrdla nastupilo, dolazi do porasta momenta ili aksijalne sile ili i jednog i drugog. U slučaju trošenja poprečne oštrice dolazi do brzog porasta posmične sile, a u manjem iznosu se povećava moment. Kod trošenja na uglovima nastaje povećanje momenta i posmične sile. Trošenje stražnje površine svrdla je neravnomjerno, na obodnom dijelu je najveće, a u blizini poprečne oštrice je najmanje. Najnepovoljniji slučaj trošenja je trošenje uglova i ruba svrdla jer su na tim mjestima najveće obodne brzine [25].



**Slika 49.** Trošenje svrdla: a) trošenje stražnje površine, b) plastična deformacija, c) krzanje, d) naljepak (BUE) [26]



**Slika 50.** Trošenje stražnje površine svrdla (VB) [23]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO 2

U eksperimentalnom dijelu 2 bilo je potrebno ispitati utjecaj dodavanja grafitnih nanočestica osnovnoj emulziji na generiranje sila rezanja kod postupka bušenja. Cilj ovog eksperimenta bio je istražiti da li će primjena grafitnih nanočestica poboljšati funkcionalnost procesa, tj. da li će primjena grafitnih nanočestica doprinjeti reduciranju sila rezanja. Bušenjem prolaznih provrta u čeličnoj ploči pratila se vrijednost aksijalne sile bušenja, i to pri različitim režimima obrade i različitim primjenjivanim suspenzijama. U eksperimentu je provedeno ukupno 240 mjerenja, tj. po 60 mjerenja za svaku pripremljenu suspenziju (čista emulzija, emulzija + 0,5 g/l grafitnih nanočestica, emulzija + 1 g/l grafitnih nanočestica, emulzija + 2 g/l grafitnih nanočestica). Pri provedbi eksperimenta varirale su se 4 različite kombinacije režima obrade, što znači da su korištene dvije brzine rezanja ( 35 i 70 m/min) i dva posmaka ( 0,05 i 0,1 mm/okr). Zadani eksperiment proveden je u Laboratoriju za alatne strojeve (Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zavod za tehnologiju, Katedra za alatne strojeve).

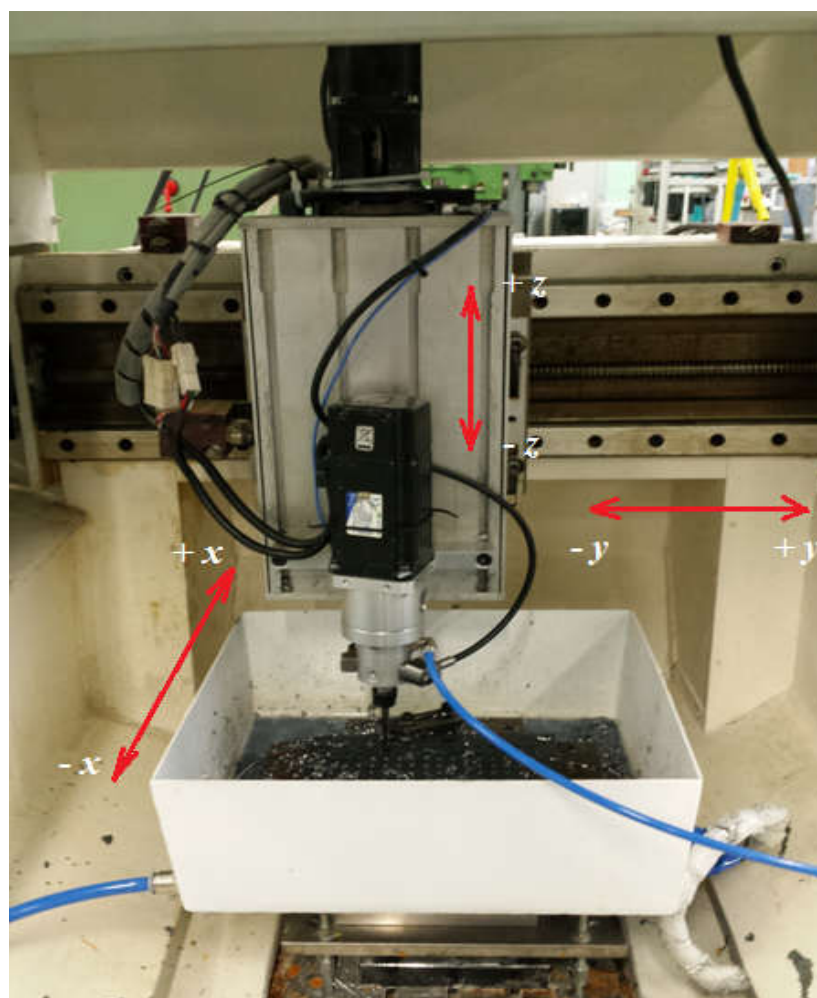
### 6.1. OPREMA ZA IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

#### 6.1.1. Alatni stroj

Eksperiment se provodio na troosnoj numerički upravljanoj portalnoj glodalici (**Slika 51.**). Motori glavnog i posmičnog gibanja su sinkroni servomotori. Posmični prigoni glodalice izvedeni su pomoću kugličnih navojnih vretena i pripadajućih kotrljajućih vodilica, dok je glavni prigona izveden direktnim prijenosom momenta glavnog motora na svrdlo pomoću odgovarajuće stezne naprave [23]. Osim troosne NU portalne glodalice, postav za ispitivanje sastojao se i od senzora za mjerenje sila rezanja, pripadajuće opreme za obradu signala te računala za upravljanje alatnim strojem te za prikazivanje podataka procesa obrade i rezultata mjerenja. Važno je naglasiti kako se za potrebe eksperimenta posebno konstruiralo glavno vreteno sa modulom za protočno hlađenje te kada za SHIP u kojoj se nalazi stezna naprava. Kada za SHIP se zajedno sa steznom napravom pomoću vijaka fiksirala na uređaj za mjerenje sila koji je stegnut na radnom stolu glodalice. Osim mjerenja sila rezanja, kontinuirano se mjerila struja regulatora glavnog kao i posmičnih motora.

**Tablica 5.** Tehničke karakteristike glodalice [23]

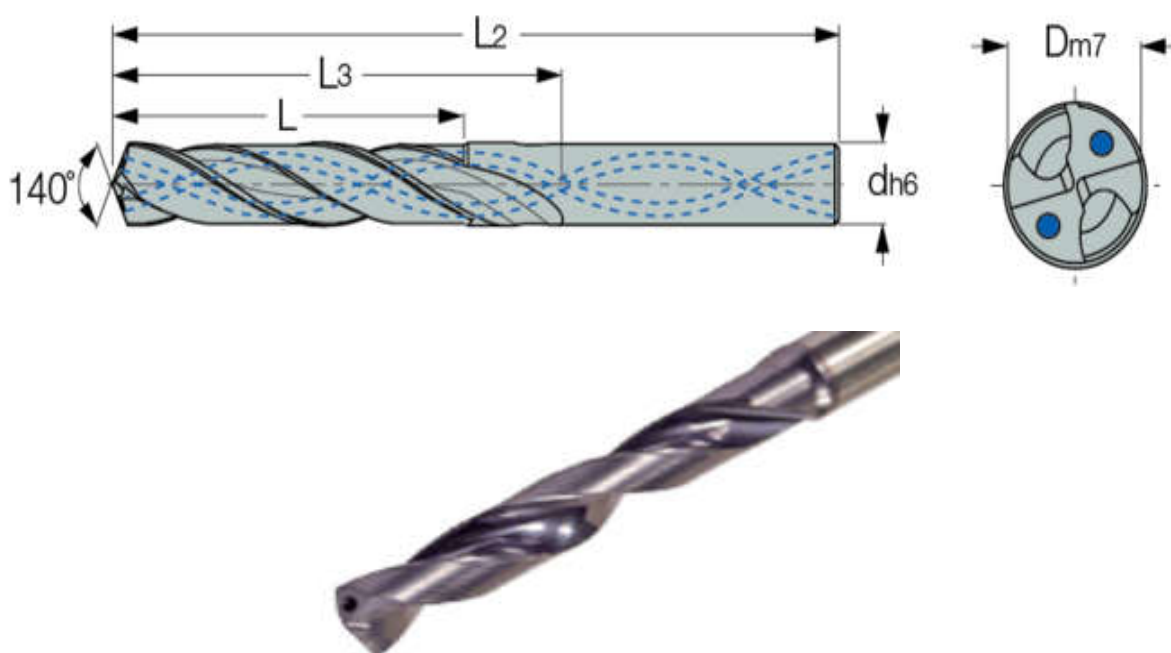
		Iznos	Jedinica
<b>Hod osi</b>	<b>x</b>	<b>350</b>	<b>mm</b>
	<b>y</b>	<b>450</b>	
	<b>z</b>	<b>55</b>	
	<b>c</b>	<b>360</b>	<b>°</b>
<b>Korak navojnog vretena osi</b>	<b>x, y, z</b>	<b>5</b>	<b>mm</b>
<b>Maksimalna posmična brzina osi</b>	<b>x, y, z</b>	<b>15</b>	<b>m/min</b>
	<b>c</b>	<b>18000</b>	<b>°/s</b>
<b>Maksimalni brzi hod osi</b>	<b>x, y, z</b>	<b>25</b>	<b>m/min</b>
	<b>c</b>	<b>30000</b>	<b>°/s</b>
<b>Nazivna učestalost vrtnje GV</b>	<b>3000</b>		<b>min<sup>-1</sup></b>
<b>Maksimalna učestalost vrtnje GV</b>	<b>5000</b>		<b>min<sup>-1</sup></b>

**Slika 51.** Troosna NU portalna glodalica

### 6.1.2. Alat

U eksperimentu se koristilo višenamjensko spiralno protočno svrdlo kvalitete IC 908, proizvođača Iscar Cutting Tools. Svrldo primjenjivano u ovome eksperimentu izrađeno je od tvrdog metala dok je prevlaka od TiAlN postignuta PVD postupkom prevlačenja. Svrldo se sastoji od dvije rezne oštrice te su u njemu napravljena dva kanala s ciljem lakše dobave SHIP – a do zone rezanja. Kut vrha svrdla iznosi  $140^\circ$ , promjer svrdla je  $d = 4,5 \text{ mm}$ , a ukupna duljina  $L_2 = 7,4 \text{ cm}$ . Preporučena maksimalna dubina rezanja iznosi  $5 \times d = 22,5 \text{ mm}$ .

**Slika 52.** prikazuje svrdlo korišteno u eksperimentu.

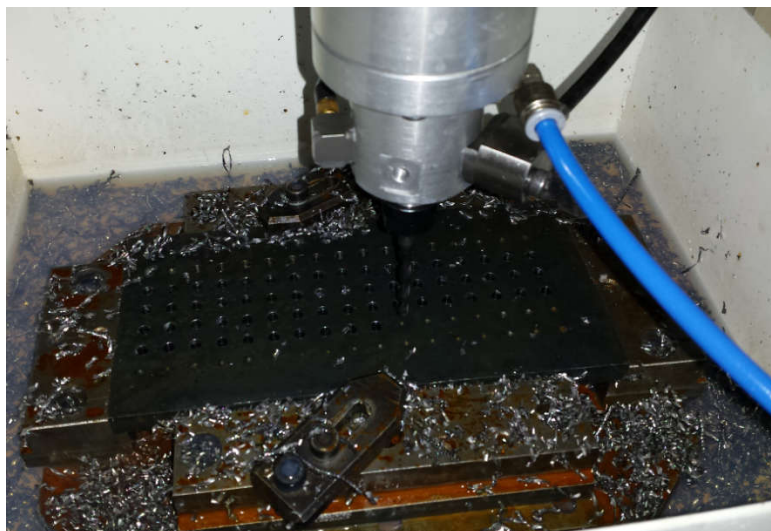


**Slika 52.** Svrldo korišteno u eksperimentu [27]

### 6.1.3. Obradak

Ispitni uzorak na kojemu se provodio eksperiment bio je pravokutni komad dimenzija  $200 \times 90 \times 10 \text{ mm}$ . Materijal obrađivanog komada je konstrukcijski čelik Č0361. Približan udio ugljika u ovom konstrukcijskom čeliku je  $0,17 \%$ . Vlačna čvrstoća iznosi  $R_m = 370 - 450 \text{ MPa}$ , dok je granica razvlačenja približno jednaka  $R_e = 240 \text{ MPa}$ . Prije same obrade obradak se stezao pomoću stezne naprave za pločaste komade koja je napravljena radi potrebe eksperimenta. Na **Slici 53.** je prikazan obradak stegnut u steznoj napravi za vrijeme obrade.





**Slika 53.** Prikaz stegnutog obratka za vrijeme obrade

#### 6.1.4. Mjerni sustav

##### 6.1.4.1. Uređaj za mjerenje sila rezanja

Za mjerenje sila rezanja kod postupka bušenja primjenjen je senzor za trokomponentno mjerenje sila (u smjeru x, y i z osi), proizvođača Kistler Holding AG (tip 9257B). Senzor sila posjeduje električni mjerač s piezoelektričnim pretvornikom. Senzor sila nalazi se ispod stezne naprave i pričvršćen je na pomičnu „x“ os stroja. Osim piezoelektričnog senzora korišteno je i nabojno pojačalo proizvođača Kistler Holding AG (tip 5017B) čija je funkcija pretvaranje električnog naboja koji stvara piezoelektrični senzor u proporcionalni naponski signal.



**Slika 54.** Uređaj za mjerenje sila Kistler 9257B [28]

**Tablica 6.** Tehnološke karakteristike uređaja za mjerenje sila [28]

		Područje	Mj. jedinica
Mjerno područje	$F_x, F_y$	-5...5	kN
	$F_z$	-5...10	
Maksimalne dozvoljene sile	$F_x, F_y$	-7,5/7,5	
	$F_z$	-7,5/15	
Osjetljivost	$F_x, F_y$	-7,5	pC/N
	$F_z$	-3,7	
Frekvencijsko područje	x, y	~ 2,3	kHz
	z	~ 3,5	
Linearnost mjernog područja		$< \pm 1$	%
Temperaturno područje		0 - 70	°C

#### 6.1.4.2. Programski paket

Za potrebe eksperimenta koristio se računalni software LabWiew (**Slika 55**) pomoću kojeg se dobivao uvid u rezultate mjerenja. Funkcije programskog paketa LabWiew su sljedeće:

- kontinuirano snimanje svih signala procesa obrade povezanih s mjernom stanicom
- generiranje mjerne datoteke
- vizualni prikaz dobivenih rezultata.

**Slika 55.** Određivanje parametara obrade i prikaz rezultata mjerenja

## 6.2. PLANIRANJE I PROVEDBA EKSPERIMENTA

Prije nego što se započelo s eksperimentom bilo je potrebno pripremiti četiri različite suspenzije (kao i u ekperimentalnom dijelu 1) : čistu emulziju (5%), emulziju s udjelom nanočestica 0,5 g/l, emulziju s udjelom nanočestica 1 g/l i emulziju s udjelom nanočestica 2 g/l. Za potrebe eksperimenta napravljeno je po 10 l svake suspenzije. Kako bi se nanočestice što bolje dispergirale u osnovnoj emulziji, u Zavodu za materijale provedeno je ultrazvučno miješanje pripremljenih suspenzija pomoću ultrazvučne sonotrode Bandelin SONOPULS HD 3400 (**Slika 56.**). Promjer sonotrode je 25 mm, frekvencija 20 kHz te snaga sonotrode u rasponu od 60 – 300 W. Nakon pripreme nanofluida moglo se započeti s eksperimentom. Prije postupka bušenja provrta bilo je potrebno provesti operaciju zabušivanja radi što boljeg centriranja svrdla. Na jednoj čeličnoj ploči zabušeno je 6 redova po 17 rupa, što znači da je na jednom obratku bilo moguće obaviti 102 mjerenja.



**Slika 56.** Uređaj za ultrazvučno miješanje – ultrazvučna sonotroda

Za svaku od četiri pripremljenih suspenzija provedeno je 60 ispitnih mjerenja kako bi se što bolje utvrdio utjecaj na generiranje sila rezanja kod potupka bušenja. Na temelju tehničkih karakteristika alatnog stroja i preporučenih režima obrade za odabrano spiralno svrdlo iz Iscar – ovog kataloga, odlučeno je kako će se u eksperimentu varirati četiri različite kombinacije režima obrade, tj. sile rezanja će se ispitivati za dvije različite brzine rezanja (35 i 70 m/min što odgovara brzinama vrtnje spiralnog svrdla od 2500 i 5000 s<sup>-1</sup>) i dva različita posmaka (0,05 i 0,1 mm/okr). Protok SHIP – a kroz dvokanalno svrdlo bio je  $q = 0,5 \text{ l/min} = 30 \text{ l/h}$ . Za svaku kombinaciju režima obrade bilo je provedeno 15 ispitivanja, što daje 60 mjerenja za pojedinu suspenziju. Za svako novo mjerenje primjenjena je drugačija kombinacija režima obrade. Nakon upisivanja parametara obrade u računalni software LabWiev uslijedilo je pokretanje alatnog stroja te izrada provrta. Nakon izvršene obrade rezultati mjerenja zapisivani su u tabličnom obliku u programu „Microsoft Office Excel 2007“.

**Tablica 7.** Plan provedbe eksperimenta

Suspenzija	Režim obrade	Broj mjerenja za pojedini režim	Ukupan broj mjerenja za pojedinu suspenziju	Ukupan broj mjerenja
Čista (5%) emulzija (K1)	1. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15	60	240
	2. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
	3. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15		
	4. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
Emulzija + 0,5 g/l gnč (K2)	1. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15	60	
	2. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
	3. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15		
	4. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
Emulzija + 1 g/l gnč (K3)	1. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15	60	
	2. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
	3. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15		
	4. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
Emulzija + 2 g/l gnč (K4)	1. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15	60	
	2. $v_c=70\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		
	3. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,05\text{mm/okr}$	15		
	4. $v_c=35\text{m/min}$ , $f=0,1\text{mm/okr}$	15		

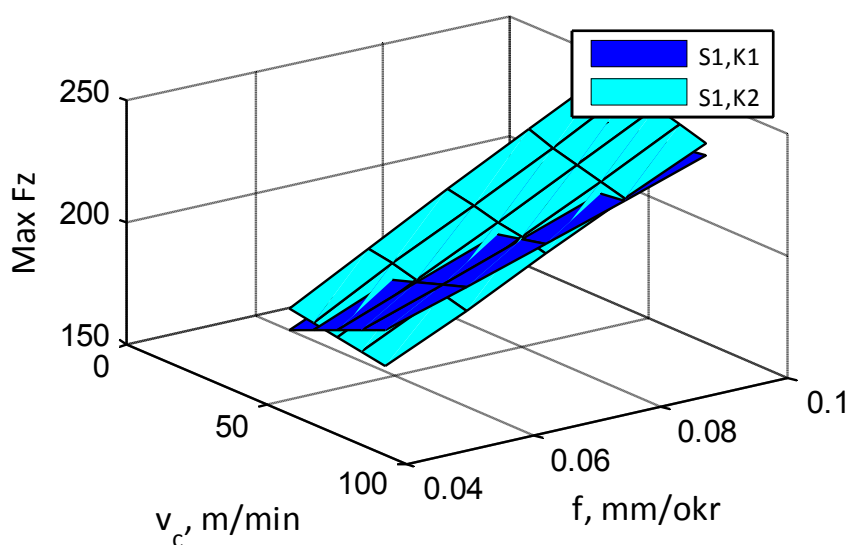
\*Napomena: gnč – grafitne nanočestice

### 6.3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Nakon dijela eksperimenta koji se sastojao od bušenja provrta pristupilo se analizi rezultata mjerenja dobivenih pomoću pripadajućeg mjernog sustava. Analizom rezultata iz signala sila moguće je prikazati ovisnost razmatranih sila rezanja o parametrima obrade (brzini rezanja i posmaku) te prikazati razlike u izmjerenim silama rezanja za slučaj korištenja različitih suspenzija s oznakama K1 (čista emulzija), K2 (emulzija + 0,5 g/l), K3 (emulzija + 1 g/l) i K4 (emulzija + 2 g/l). Stupanj istrošenosti svrdla nije se razmatrao.

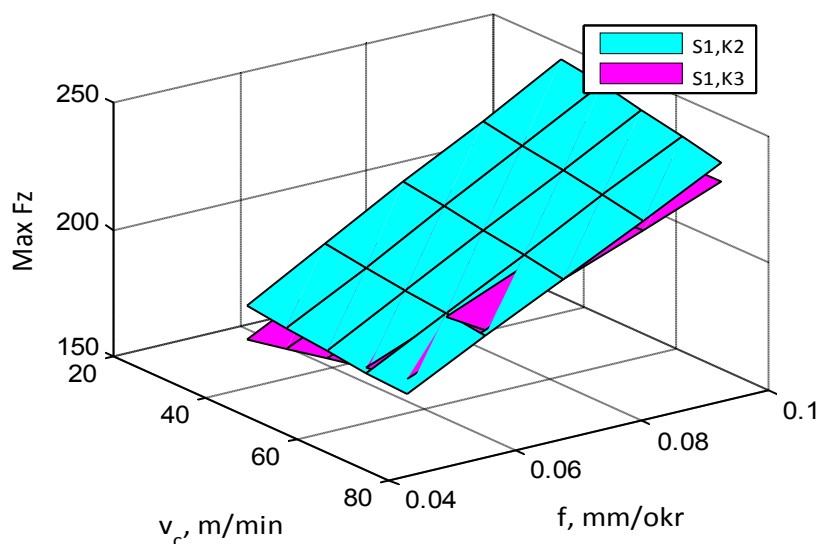
#### 6.3.1. Rezultati mjerenja aksijalne sile bušenja

Dijagrami na **Slikama 57.**, **58.**, **59.** i **60.** prikazuju vrijednosti aksijalne sile bušenja  $F_z$  za različite kombinacije korištenih suspenzija. Iz dijagrama je vidljivo kako aksijalna sila  $F_z$  značajno raste povećanjem posmaka. Promjena brzine rezanja, tj. povećanje brzine rezanja nema zamjetan utjecaj na povećanje aksijalne sile. Logično je da posmak ima veći utjecaj na aksijalnu silu nego brzina rezanja pošto povećanje posmaka rezultira većim presjekom odvojene čestice. Iz dijagrama sa **Slike 57.** vidljivo je kako je aksijalna sila veća u slučaju primjene suspenzije K2 nego K1. Pri većim brzinama rezanja kao i manjim posmacima dolazi do smanjenja aksijalne sile.

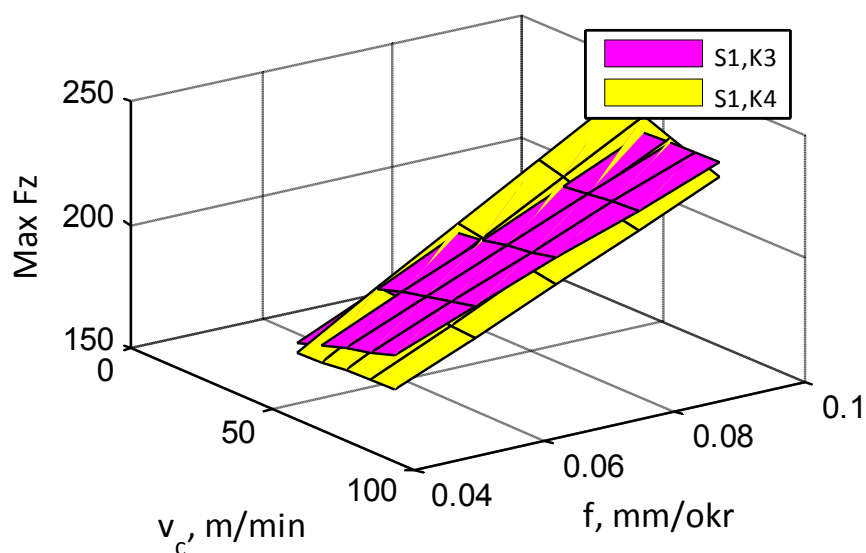


**Slika 57.** Vrijednosti aksijalne sile  $F_z$  za kombinaciju suspenzija K1 i K2

Iz dijagrama sa **Slike 58.** vidljivo je kako je aksijalna sila u slučaju primjene suspenzije K3 manja nego u slučaju primjene suspenzije K2. Dodatkom 0,5 g/l grafitnih nanočestica osnovnoj emulziji aksijalna sila bušenja se povećala, dok je dodavanjem 1 g/l grafitnih nanočestica osnovnoj emulziji aksijalna sila ostala relativno jednaka kao u slučaju primjene čiste 5% - ne emulzije. Slabo smanjenje aksijalne sile u odnosu na čistu emulziju pristutno je tek kod većih brzina rezanja i manjih posmaka.

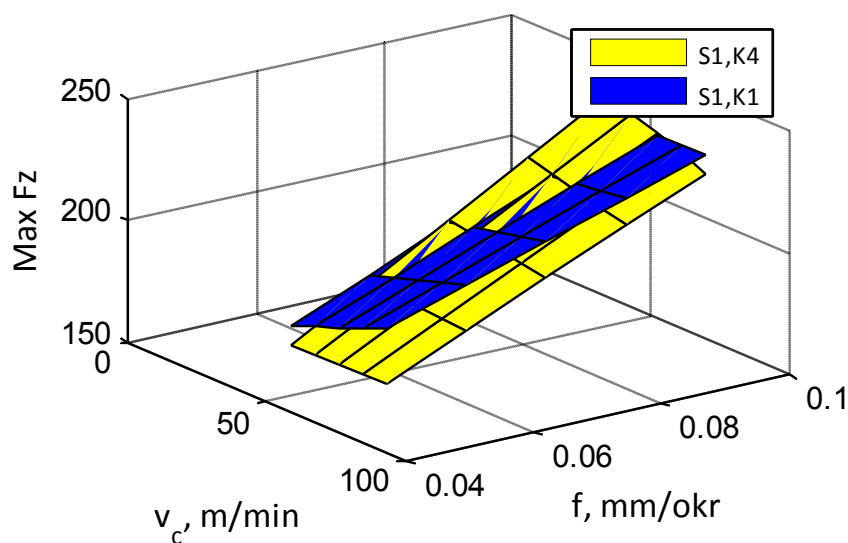


**Slika 58.** Vrijednosti aksijalne sile  $F_z$  za kombinaciju suspenzija K2 i K3



**Slika 59.** Vrijednosti aksijalne sile  $F_z$  za kombinaciju suspenzija K3 i K4

Dijagrami sa **Slika 59.** i **60.** prikazuju usporedbu aksijalne sile bušenja pri korištenju suspenzija K3 i K4 odnosno K1 i K4. Vidljivo je kako primjena suspenzija K1 i K3 daje približno podjednake aksijalne sile, usporedno s primjenom suspenzije K4. Pri većim posmacima i manjim brzinama rezanja korištenje suspenzije K4 rezultira nešto većim aksijalnim silama, no kod ostalih kombinacija režima obrade aksijalne sile su manje ili podjednake usporedno s primjenom suspenzija K1 i K3. Stoga je vidljivo kako primjena emulzije s udjelom nanočestica 2 g/l daje najbolje rezultate, uz iznimku pri većim posmacima i manjim brzinama rezanja.

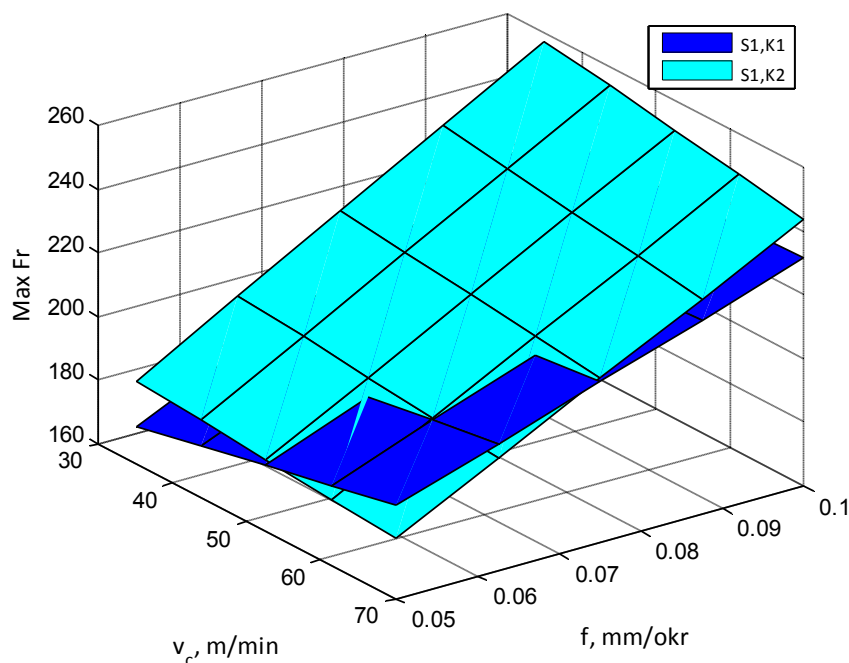


**Slika 60.** Vrijednosti aksijalne sile  $F_z$  za kombinaciju suspenzija K4 i K1



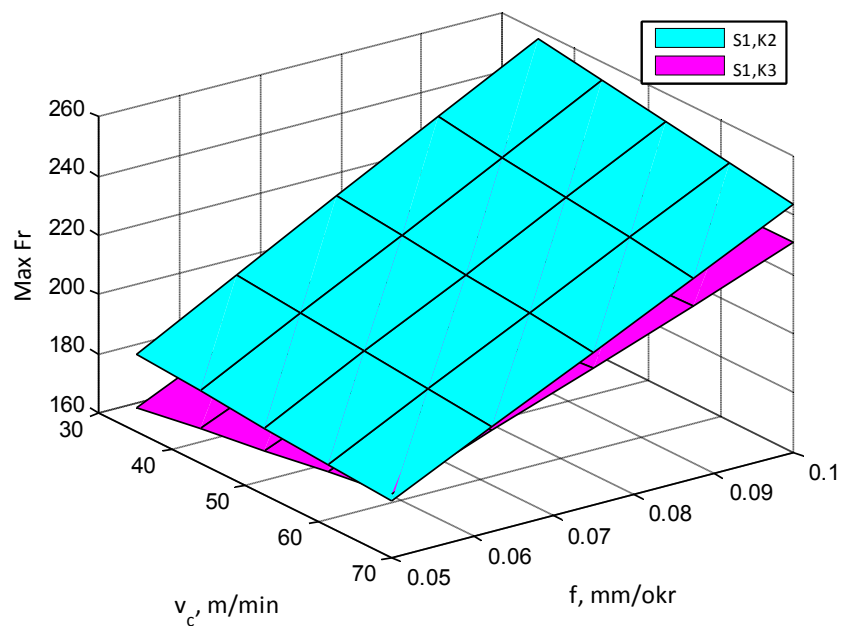
### 6.3.2. Rezultati mjerenja resultantne sile

Dijagrami sa **Slika 61.**, **62.**, **63.** i **64.** prikazuju vrijednosti resultantne sile bušenja  $F_r$  za različite kombinacije korištenih suspenzija. Kao što je bio slučaj i kod aksijalne sile bušenja, tako i resultantna sila bušenja raste povećanjem posmaka, dok brzina rezanja nema pretjerano velik utjecaj. Rezultati mjerenja slični su kao i kod mjerenja aksijalne sile. Primjena suspenzije K2 rezultira povećanjem resultantne sile u odnosu na čistu emulziju. Tek pri velikoj brzini rezanja i malom posmaku resultantna sila za primjenu K2 je manja u odnosu na K1. Daljnjim povećanjem udjela nanočestica, točnije primjenom suspenzije K3 resultantna sila ispada približno jednaka kao i kod korištenja čiste emulzije. Male oscilacije (razlike) prisutne su pri velikim brzinama rezanja i malim posmacima gdje primjena suspenzije K3 daje nešto manje resultantne sile, te pri velikim posmacima i malim brzinama rezanja gdje pak primjena K1 daje nešto manje resultantne sile. Korištenje suspenzije K4 daje najbolje rezultate, iako je pri velikim posmacima i manjim brzinama rezanja efikasnija primjena čiste emulzije.

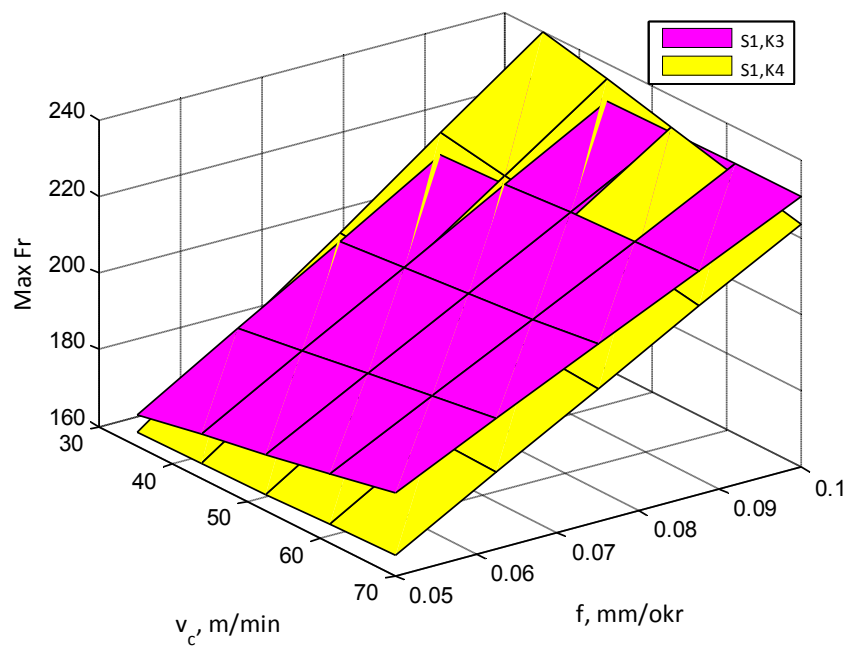


**Slika 61.** Vrijednosti resultantne sile  $F_r$  za kombinaciju suspenzija K1 i K2

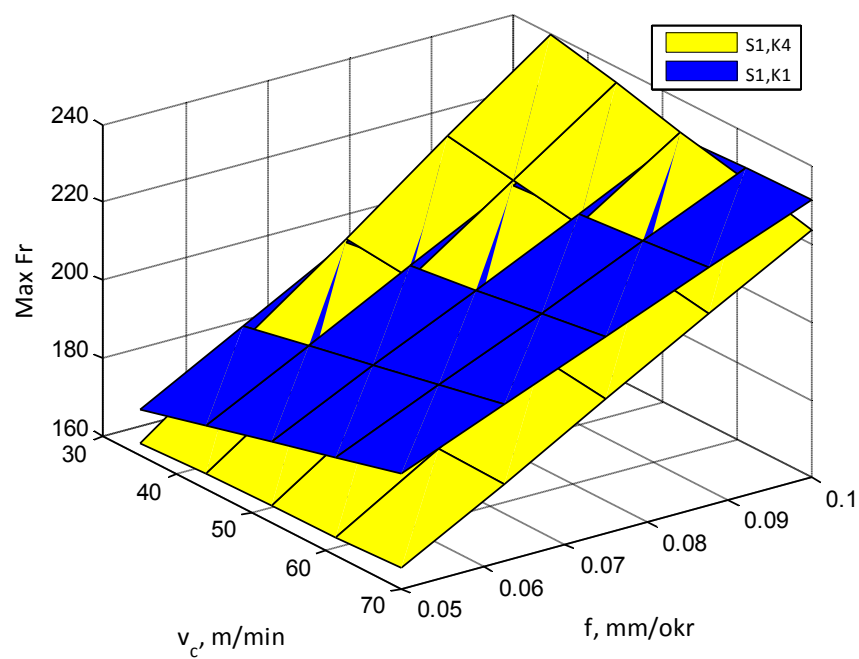




**Slika 62.** Vrijednosti rezultantne sile  $F_r$  za kombinaciju suspenzija K2 i K3



**Slika 63.** Vrijednosti rezultantne sile  $F_r$  za kombinaciju suspenzija K3 i K4



**Slika 64.** Vrijednosti rezultantne sile  $F_r$  za kombinaciju suspenzija K4 i K1

## 7. ZAKLJUČAK

Ovim radom ispitane su mogućnosti primjene grafitnih nanočestica u sredstvima hlađenja, ispiranja i podmazivanja kod postupka bušenja. Obrada odvajanjem čestica, jedna od najznačajnijih tehnologija, kontinuirano je potaknuta zahtjevima za što učinkovitijom obradom, što većom kvalitetom proizvoda i što većom konkurentnošću na tržištu. Unatoč tomu što je nepovoljna za okoliš i ljudsko zdravlje, primjena sredstava hlađenja, ispiranja i podmazivanja (SHIP) u postupcima obrade odvajanjem značajno potpomaže odvijanje samoga procesa. Kako bi se poboljšala funkcionalnost SHIP – a, sve je popularnija primjena nanočestica. Dodavanjem nanočestica osnovnom SHIP – u, tj. formiranjem nanofluida, otvaraju se ogromne mogućnosti kako u obradi odvajanjem čestica, tako i u ostalim područjima.

Cilj ovog rada bio je ispitati kako će dodavanje grafitnih nanočestica osnovnoj emulziji utjecati na generiranje sila rezanja pri postupku bušenja. Dodavanje nanočestica značajno utječe na poboljšanje toplinskih svojstava. Vođeni tom činjenicom, prvo je bilo potrebno ispitati toplinsku vodljivost i dinamičku viskoznost za četiri različite suspenzije (čista emulzija, emulzija + 0,5 g/l gnč, emulzija + 1 g/l gnč i emulzija + 2 g/l gnč) pri temperaturama 20°C, 30°C i 40°C. Rezultati ispitivanja pokazali su kako toplinska vodljivost porastom udjela nanočestica pokazuje tendenciju rasta dok se dinamička viskoznost ne mijenja znatno. Dobiveni rezultati mjerenja toplinske vodljivosti i toplinske viskoznosti nagovijestili su velike mogućnosti pripremljenih nanofluida u postupcima obrade odvajanjem.

U drugom dijelu rada proveden je eksperimentalni dio koji se sastojao od bušenja provrta u čeličnom obradku i mjerenja sila rezanja pomoću odgovarajućeg mjernog sustava. Ukupno je obavljeno 240 mjerenja, po 60 za svaku pripremljenu suspenziju. Bitno je napomenuti kako su suspenzije korištene pri izradi provrta identične onima koje su upotrijebljene pri ispitivanju toplinske vodljivosti i dinamičke viskoznosti. Analizom rezultata mjerenja utvrđeno je kako dodavanje 0,5 g/l grafitnih nanočestica negativno utječe na odvijanje procesa, tj. dolazi do porasta resultantne i aksijalne sile bušenja za razliku od primjene čiste emulzije. Za slučaj dodavanja 1 g/l grafitnih nanočestica dobiveni rezultati su veoma slični kao i kod primjene čiste emulzije, uz male razlike pri određenim kombinacijama režima obrade. Tek dodavanjem 2 g/l grafitnih nanočestica dolazi do reduciranja aksijalne i resultantne sile rezanja, iako je za određene režime (veliki posmaci, male brzine rezanja) čak i bolja primjena čiste emulzije.

Može se zaključiti kako postepenim dodavanjem nanočestica grafita sile rezanja pokazuju tendenciju pada što odgovara unaprijed očekivanim pretpostavkama. U budućim istraživanjima korisno bi bilo ispitati sile rezanja pri još većim udjelima nanočestica, a poželjno bi bilo i variranje veličine i vrste nanočestica pošto je u ovome radu korištena samo jedna veličina (50 nm) i jedna vrsta (grafitne nanočestice) nanočestica. Također se preporuča izvođenje pokusa s više kombinacija režima obrade kao i uključanje parametra stupnja istrošenosti reznih oštrica svrdla.

## LITERATURA

- [1] Udiljak T. , Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica – predavanja
- [2] Chou Y.K. : Machining as an Alternative to Surface Hardening of Steel Parts A Preliminary Investigation, University of Alabama, Tuscaloosa, 2005.
- [3] Levatić R. , Diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [4] Škorić S. , Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica – predavanja
- [5] Botički B. , Završni rad, Zagreb, 2010.
- [6] Nedić B. , Lazić M : Proizvodne tehnologije – Obrada metala rezanjem, predavanja, Mašinski fakultet, Kragujevac
- [7] Krajnik P. , Pusavec F. , Rashid A. : Nanofluids – Properties, Applications and Sustainability Aspects in Materials Processing Technologies, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia
- [8] Brinksmeier E. , Meyer A. , Housman – Cordes A.G. , Herrmann C. : Manufacturing Technology Metalworking Fluids – Mechanisms and Performance, 2015.
- [9] Dixit U.S. , Sarma D.K. , Davim J.P. : Environmentally Friendly Machining , Chapter 2 – Machining with Minimal Cutting Fluids, 2012.
- [10] Pižota V. , predavanja, Prehrambeno – tehnološki fakultet, Sveučilište J.J.Strossmayer, Osijek, 2009.
- [11] Saidur R. , Leong K.Y. , Mohammad H.A. : A Review on Applications and Challenges of Nanofluids, 2011.
- [12] Boysen E. , Booker R. : Nanotechnology for Dummies, Wiley Publishing, Inc. , 2005.
- [13] Baogang Wang , Xiaobo Wang , Wenjing Lou , Jingcheng Hao : Thermal Conductivity and Rheological Properties of Graphite/Oil Nanofluids, 2012.
- [14] Gopalan R. , Prabhu N.K. : Review of Thermo – Physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and Their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment, 2011.

- [15] Šavar M. , Virag Z. , Džijan I. : Mehanika fluida – skripta predavanja, Zagreb, 2014.
- [16] Duan F. , Wang T. , Crivoi A. : Dynamic Viscosity Measurement in non – Newtonian Graphite Nanofluids, 2012.
- [17] Khanafer K. , Vafai K. : A Critical Synthesis of Thermophysical Characteristics of Nanofluids, 2011.
- [18] <http://www.bechem.com>
- [19] <http://www.mknano.com>
- [20] Decagon devices, Operator's Manual, KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, versin 12
- [21] Brookfield, More Solutions to Sticky Problems, A Guide to Getting More From Your Brookfield Viscometer
- [22] Penava F. , Modeliranje svojstava nanofluida na bazi  $\text{TiO}_2$  i  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Zagreb, 2015.
- [23] Hršak E. , Diplomski rad, Zagreb, 2014.
- [24] Slade I. , Obrada materijala II, Zagreb
- [25] Salopek M. , Diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [26] <http://www.sandvik.coromant.com>
- [27] <http://www.iscar.com/eCatalog/>
- [28] <https://www.kistler.com/hr/en/>